

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРИЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Спеціальність 171 Електроніка
(код та назва спеціальності)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

на тему: Волоконно-оптичний датчик температури з розподіленими параметрами

Виконав: студент IV курсу, групи ДЕ-зп71
Ліщинський Дмитро Ігорович
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

(підпис)

Керівник: доцент, доцент, к.т.н. Чадюк В.О.
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант Технічний розділ
(назва розділу) (посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант
по нормоконтролю: доцент, доцент, к.т.н. Чадюк В.О.
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

[illegible]

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра електронних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Ліщинський Дмитро Ігорович
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема проєкту Волоконно-оптичний датчик температури з розподіленими параметрами

Керівник проєкту Чадюк Вячеслав Олексійович, к.т.н., доцент

затверджені наказом по університету від « 25 » травня 2020 року № 1196-с

2. Термін подання студентом проєкту 5 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до проєкту Датчик температури з розподіленими параметрами на основі оптичного волокна з бреггівськими ґратами.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)
Огляд конструкцій волоконно-оптичних датчиків. Аналіз елементів датчиків на бреггівських ґратах. Вибір джерела випромінювання. Розрахунок чутливості датчика.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)
Кресленик структурної схеми волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами. 2 плакати.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Ім'я ПРІЗВИЩЕ, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання 10.02.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по волоконно-оптичних датчика з розподіленими параметрами	10.02–10.3.2020	
2	Аналіз елементів датчика	11.03–10.04.2020	
3	Розроблення структури датчика	11.04 – 10.05.2020	
4	Розрахунок чутливості датчика	11.05–20.05.2020	
5	Оформлення текстової та графічної документації проекту	21.05–04.06.2020	

Студент

(підпис)

Дмитро Ліщинський
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту

(підпис)

Вячеслав Чадюк
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Огляд літератури по волоконно-оптичним датчикам (ВОД) дозволяє зробити висновок, що в даний час дослідження в області ВОД інтенсивно розвиваються. Найчастіше вибір оптичного волокна (ОВ) не обмежується вибором одномодового волокна (ОДВ) або багатомодового волокна (БВ).

Асортимент оптичних волокон досить різноманітний, і в залежності від досліджуваних об'єктів, найкраще рішення може виявитися використання конкретного типу волокна під необхідну ситуацію.

ОВ можна назвати не лише найкращим фізичним середовищем для передачі інформації, а й найбільш перспективним передавачем потоків великого обсягу інформації на значні відстані. В даній главі

були розглянуті основні характеристики оптичних волокон та були проаналізовані класифікації ВОД.

Для найбільш успішного використання датчикам бажано мати високі метрологічні характеристики,

високу фундаментальність або надійну конструкцію, малу вагу, невеликий розмір і економне енергоспоживання,

і одне з найголовніших – датчики повинні бути сумісними з мікроелектронними пристроями при низькій трудомісткості

виготовлення і невеликій ціні. Ці вимоги задовольняються волоконно-оптичними датчиками. При розгляді різних типів ВОД,

в даній роботі був вибраний датчик на основі бреггівських ґрат, через унікальні характеристики даного типу датчиків.

Розглянуті проаналізовані елементи датчика на основі бреггівських ґрат,: світлодіод,

чутливий елемент, цифрова камера та їх характеристики. В якості чутливого елемента була вибрана волоконна

бреггівська ґратка. Через те, що ВБГ представляє з себе селектує дзеркало, при випроміненні в оптоволокну

від широкопasmового, такого, як світлодіод, джерела, світло відбивається з вузькою спектральною смугою з

центром на довжині хвилі Бреґґа. Світло, що залишається - продовжує свій рух в оптоволокну без зайвих втрат.

Світлодіоди знаходять широке застосування як кероване джерело живлення. У порівнянні з іншими джерелами світла

світлодіоди мають велику кількість переваг: висока світлова віддача, механічна міцність, широкий спектр світла,

світлодіоди - екологічно чистий продукт, мають малу вагу, невеликий розмір, невелику енерговитратність, довговічність і т.д.

За допомогою цифрової камери є можливість зафіксувати виміряні параметри на екрані комп'ютера, камера є дуже важливим

елементом, тому необхідно підійти до цього питання серйозно. При виборі цифрової камери необхідно звернути увагу на такі

параметри, як: низький рівень шумів, висока швидкість зчитування,

енерговитратність, компактність, невелика ціна, саме

тому я рекомендую використовувати цифрову камеру нового покоління sCMOS.

A N N O T A T I O N

When reviewing the literature, we can conclude that currently research in areas of water are developing rapidly. In most cases, the choice of OB is not limited to the choice of EFA or BV.

The range of optical fibers is quite diverse, and depending on the objects studied,

the best solution may be to use a specific type of fiber for the desired situation.

OB can be called not only the best physical medium for the transmission of information, but also the most

a promising transmitter of large amounts of information over long distances. In this chapter

the main characteristics of optical fibers were considered and the classifications of VOD were analyzed.

For the most successful use of sensors, it is desirable to have high metrological characteristics,

high fundamentality or reliable design, light weight, small size and economical energy consumption,

and one of the most important - sensors must be compatible with microelectronic devices at low complexity

manufacture and small price. These requirements are met by fiber-optic sensors. When considering different types of ICE,

in this work, a sensor based on Bragg lattices was chosen due to the unique characteristics of this type of sensors.

The analyzed elements of the sensor on the basis of Bragg lattices are considered: LED,

sensitive element, digital camera and their characteristics. Fiber was chosen as the sensing element

Bregg's lattice. Due to the fact that VBG is a selective mirror, when irradiated into fiber

from a broadband, such as an LED, source, the light is reflected with a narrow spectral band with

center on the Bragg wavelength. The remaining light continues to move in the fiber without unnecessary losses.

LEDs are widely used as a controlled power supply. Compared to other light sources

LEDs have many advantages: high light output, mechanical strength, a wide range of light,

LEDs are an environmentally friendly product, have low weight, small size, low energy consumption, durability, etc.

With the help of a digital camera it is possible to record the measured parameters on a computer screen, the camera is very important

element, so it is necessary to approach this issue seriously. When choosing a digital camera, you need to pay attention to the following

parameters like: low noise, high reading speed, power consumption, compactness, low price, namely

so i recommend using the new generation sCMOS digital camera.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	9
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	11
1. ОГЛЯД ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ	133
1.1. Властивості оптичних волокон	133
1.2. Типи волоконно-оптичних датчиків.	222
2. АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ ДАТЧИКІВ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ	299
2.1. Властивості бреггівських ґраток	299
2.2. Волоконна бреггівська ґратка як чутливий елемент	344
2.3. Джерело випромінювання для бреггівського датчика	366
2.4. Цифрова камера бреггівського датчика	41
Висновок	44
3. ДАТЧИК З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ	455
3.1. Структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами	455
3.2. Вибір джерела випромінювання для датчика з розподіленими параметрами	466
3.3. Розрахунок чутливості датчика з розподіленими параметрами	488
Висновок	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	51

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ								
Змн	Арк А	№ докум	№	Підпис	П	Дата							
Розроб	Ліщинський Д.І.					Волоконно-оптичний датчик з розподіленими параметрами Пояснювальна записка	Літ		Літ	Арк	Архивів		
Перевір	Чадюк В.О.									9	51		
Реценз.							«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-зп71						
Н. Контр	Чадюк В.О.												
Затверд	Ямненко Ю.С.												

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВОД – волоконно-оптичний датчик, (optical fiber sensors) – це оптоволоконні пристрої для детектування деяких величин, які використовують основним елементом оптичне волокно як в якості лінії передачі даних, так і в якості чутливого елемента;

ДС – джерело світла;

ОВ – оптичне волокно, – нитка з оптично прозорого матеріалу, за звичай скло та пластик, яка використовується для перенесення світла усередині себе за допомогою повного внутрішнього відображення;

БВ – багатомодові волокно;

ОДВ – одномодові волокно;

СД – світлодіод;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВБГ – волоконна бреггівська ґратка;

ПЗ – показник заломлення;

NA – Numerical Aperture;

WDM – Wavelength Division Multiplexing;

TDM – Time Division Multiplexing;

ПЗЗ – прилад із зарядним зв'язком;

ЗП – запам'ятовуючий пристрій;

БГ – бреггівські ґратки;

ВАХ– вольт-амперна характеристика;

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.м.	Підпис	Дата		10

ВСТУП

Термін волоконно-оптичні датчики з'явився на початку 80-их, тоді і сформувався цей тип датчиків як один із напрямків техніки. Незважаючи на це, створення датчиків на основі оптичних волокон почалось ще до середини 70-х років, а публікації з прийнятними розробками та експериментальними зразками з'являлись у другій половині 70-их років.

Основними елементами волоконно-оптичного датчика є оптичне волокно, світловипромінюючі (ДС) і світлоприймаючі пристрої, оптичний чутливий елемент. І тому вони не випромінюють і не проводять електричний струм та не схильні до електромагнітних перешкод.

Якщо класифікувати волоконно-оптичні датчики за застосуванням в них оптичного волокна, то їх можна розподілити на датчики, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі, і датчики, в яких воно використовується чутливим елементом. У датчиках типу «лінії передачі» використовуються найчастіше багатомодові оптичні волокна, а в датчиках сенсорного типу зазвичай - одномодові.

В усьому світі в даний час інтенсивно ведуться роботи зі створення оптичних систем обробки і передачі інформації. У таких системах використовуються волоконно-оптичні датчики-перетворювачі різних фізичних величин. Розвиток оптичних систем передачі інформації пов'язан, як з чудовими властивостями цих систем, так і з особливостями різних галузей науки і техніки.

Наступні чотири глави присвячені розгляду принципів дії і основ, на яких базується робота установки ВОД з розподіленими параметрами, розглянуті різні типи оптичних датчиків та охарактеризовані їх властивості. Описані елементи ВОД з розподіленими параметрами,

					<i>ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ</i>	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		11

розглянуті особливості, параметри та характеристики елементів, розрахована чутливість датчика.

В електронних системах дуже часто контроль, регулювання і передачу фізичних величин здійснюють за допомогою електричних сигналів, тому що вони є найбільш зручними для побудови різних автоматичних пристроїв, забезпечуючи високу швидкість передачі, дистанційність, сумісність і подальшу обробку .

Датчик на бреггівських ґратах новий та мало досліджений типом датчиків, який ряд переваг, які викликають до них значний інтерес і вже забезпечують їх практичне застосування.

Мета дипломної роботи :

- ознайомлення з поняттям волокно-оптичних датчиків, його властивостями, перевагами та недоліками.
- Розглянути ВОД з розподіленими параметрами, його конструкцію, розрахувати параметри.
- аналіз отриманих результатів;

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		12

1. ОГЛЯД ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

1.1. Властивості оптичних волокон

Оптичне волокно складається з серцевини, та оболонки (рис. 1.1). По серцевині розповсюджується світло, оболонка забезпечує відбивання світла в серцевину таким чином, щоб світлові хвилі поширювалися тільки по серцевині. Також поверх оболонки є додаткові покриття, які виконують захистну функцію. Серцевину зазвичай виготовляють зі скла, або з пластику.



Рис. 1.1 Структура оптичного волокна та розповсюдження світла в ньому

Чим більший діаметр серцевини, тим більша кількість світла буде передано по волокну. Захисне покриття забезпечує достатню міцність волокна, поглинання ударів та додатковий захист серцевини від навколишнього середовища. Коефіцієнт заломлення серцевини (n_1) не суттєво перебільшує коефіцієнт заломлення оболонки (n_2). Отже світло, яке входить в волокно, повністю відбивається від границі оболонки та серцевини, тобто розповсюдження проходить тільки в волокні. Для повного внутрішнього відбиття світла, що входить в серцевину під кутом θ , необхідно, щоб виконувалась умова:

$$0 \leq \theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \theta_{max}, \quad (1.1)$$

Так як різниця потенціалів між коефіцієнтами заломлення в оболонці та серцевині знаходиться в межах 0,01, то величину θ_{max} можна записати у вигляді:

$$\theta_{max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1.2)$$

Це максимально можливий кут, під яким світло може проходити в волокно, прийматися ним. Такий кут називають числовою апертурою позначається як NA (Numerical Aperture).

При розгляді оптичного волокна замість різниці n_1 , n_2 використовують величину, яка називається відносною різницею коефіцієнтів заломлення.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx n/n - 1, \quad (1.3)$$

Якщо використати значення Δ , то залежність між NA та Δ представлена наступним чином як:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (1.4)$$

Відносна різниця коефіцієнтів заломлення Δ виражається в процентах.

В середині оптоволокна світлові промені розповсюджуються та багаторазово повністю відображаються. Але, розповсюдження відбувається тоді, коли вони розповсюджуються під певними кутами. Таке розповсюдження характеризується модою, яке визначає тип розподілу електромагнітного поля. Мода має тісний зв'язок з оптичними променями, на рис. 1.2 зображено поширення променів в пластинчастому хвилеводі. Розповсюджуючись світлова хвиля являється горизонтально поляризованою та має відносно осі хвилеводу нахил ψ . Звідси хвильовий фронт перпендикулярний напрямленню світла.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Підпис	Дата		14

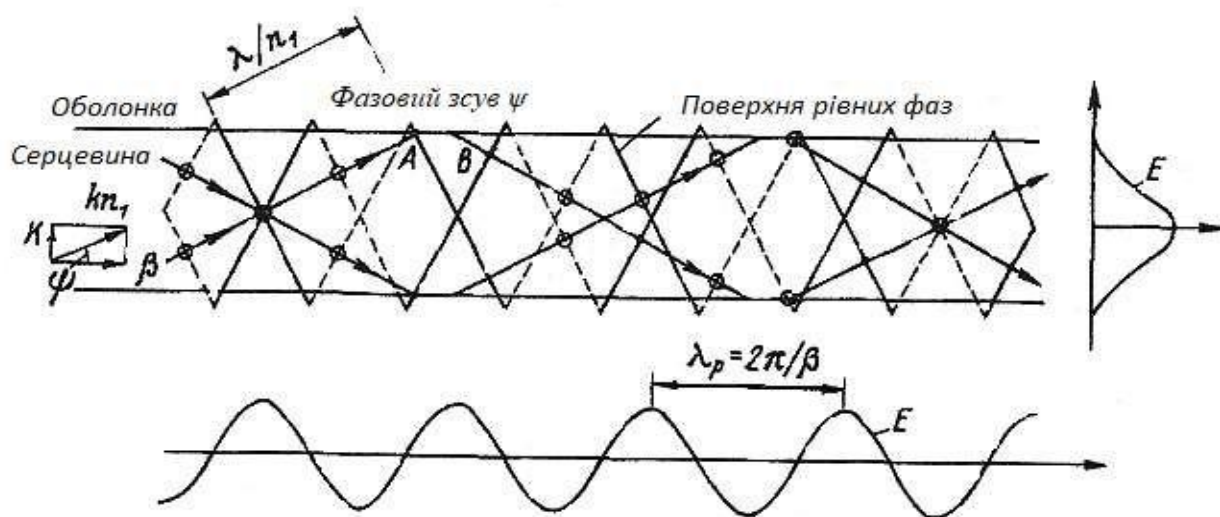


Рис.1.2 Відповідність між світловим променем і модою

На рис. 1.2 штриховою лінією позначена фазова поверхня з негативним полем, а суцільною лінією – з позитивним електричним полем. Якщо горизонтально поляризована хвиля в вакуумі має довжину λ , то в серцевині з коефіцієнтом заломлення n_1 довжина хвилі зменшується до λ/n_1 , а постійне розповсюдження хвилі k/n_1 ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$) збільшується, але постійна поширена уздовж осі:

$$\beta = kn_1 \cos \psi, \quad (1.5)$$

Отже коли повне відбиття світла, падаючого в точку А (рис. 1.2) з'ясується, що невелика частина енергії цього світла проходить в оболонку. Тому у точці В трішки зрушена фаза відносно точки А, уздовж горизонтальної осі. Але фаза відбитої хвилі також змінюється на величину ψ , яка залежна від кута падіння світлового променя. Цей зсув відбитої хвилі та зміна фази називається зсувом Гуса–Хенхена (Goos–Hänchen).

На рис. 1.2 показані умови поширення основної моди. В центрі серцевини інтенсивність електричного поля збільшується та досягає максимуму завдяки складанню позитивних (можливо негативних) фазових фронтів світлових променів. Чи, поблизу границі сердечник – оболонка

позитивні і негативні фазові фронти взаємно компенсують та електричне поле падає до нуля. При таких умовах розподілу електричного поля світла уздовж вертикальної осі представляє із себе стоячу хвилю. Цей розподіл багаторазово повторюється уздовж горизонтальної осі з періодом $\lambda_p = 2\pi/\beta$. Щоб утворити стоячі хвилі необхідно, при дзеркальному відображенні світлової хвилі вгору або вниз сума змін фази по вертикалі в ході просування хвилі за період відбиття та внаслідок зсуву Гооса-Генхена кратна 2π . Отже, для формування моди кут розповсюдження світової хвилі не може бути довільним, а світлові хвилі, у яких кут задовольняє вищевказаних умов, можуть поширюватись.

При описанні характеристик оптичних волокон одним з важливіших параметрів це нормована частота. По її значенню можемо стверджувати на скільки багато мод може поширюватись в оптоволокну. Нормована частота позначається v і визначається за формулою:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.6)$$

Для описаних оптичних волокон з ступінчастою зміною коефіцієнта заломлення значення $v=v_c=2,405$ (v_c - нормована частота зрізу) являється граничною. Коли дійсне значення v волокна менше, то поширюється лише одна мода, а коли більше, то розповсюджується багато мод. Тому й v_c визначає умови існування в оптичному волокну однієї моди, або умови зрізу мод більш високих порядків.

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{v_c} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.7)$$

Ця величина називається довжиною хвилі зрізу. Волокна в області λ_c довжиною, більшою ніж λ_c , працюють в одномодовому режимі.

Зразки оптичних волокон наведені на рис. 1.3. Зображено багатомодові оптичні волокна у яких нормована частота становить

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ локум.	Піппис	Лата		16

декілька десятків ($v \approx 30$) і в яких поширюються багато мод, також одномодові волокна зі значенням v більше ніж 2,4, поширюється лише одна мода.

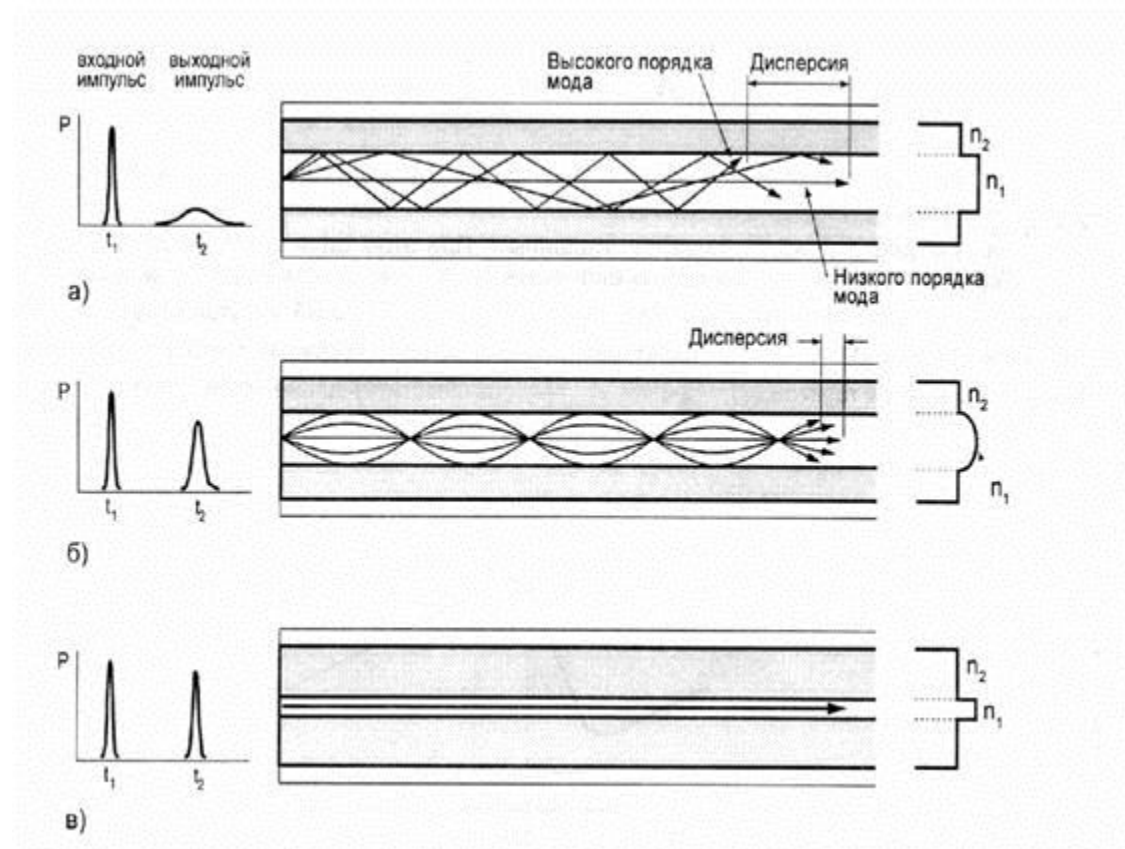


Рис. 1.3. Типи оптичних волокон: ступінчасте багатомодове (а); градієнтне багатомодове (б); одномодове (в).

Багатомодові волокна за розподілом коефіцієнта заломлення всередині серцевини діляться на волокна з ступінчастим розподілом і градієнтним (плавним). Обидва типи мають діаметр серцевини 50 мкм та, приблизно 1%, велику відносну різницю коефіцієнтів заломлення, які обумовлюють такі переваги, як порівняльна простота з'єднання з такими ж оптичними волокнами та висока ефективність з'єднання з джерелом світла.

У волокон із ступінчастим розподілом швидкість поширення моди уздовж осі волокна $v_g = \left(\frac{c}{n_1}\right) \cos\psi$ (c – швидкість світла у вакуумі), тобто зі збільшенням порядку моди швидкість її поширення зменшується.

Оскільки швидкість поширення кожної моди залежить від її порядку, на виході волокна світловий імпульс буде ширший ніж на вході.

Різниця в часі поширення між модою найвищого порядку, яка може поширюватись, і модою найнищого порядку з урахуванням критичного кута $\psi_c = \cos^{-1}(\frac{n_2}{n_1})$ виражається формулою:

$$\delta\tau = \frac{n_1 L}{c} (\frac{1}{\cos\psi_c} - 1) \approx \frac{n_1 L}{c} \Delta \quad (1.8)$$

L – довжина волокна.

Отже, частотна полоса B сигналу, яку можна передати в середині ступінчастого багатомодового волокна, визначається із виразу

$$BL = \frac{L}{\delta\tau} \frac{c}{n_1 \Delta} \quad (1.9)$$

В плавному оптичному волокні світло розповсюджується завдяки коефіцієнту заломлення серцевини, який знижує до його периферії за квадратичним законом. Точка, де промінь змінює свою траєкторію при відображенні та віддаляється від осі серцевини по мірі збільшення кута розподілу. Оскільки швидкість світла в середовищі обернено пропорційна коефіцієнту заломлення цього середовища, світловий промінь, що розповсюджується ближче до осі волокна і має більш низку моду, через більш високий коефіцієнт заломлення поблизу осі буде мати значно меншу швидкість.

Навпаки, світлові промені мод високого порядку, що відбиваються далі від центральної осі та проходять за один цикл відбиття більшу відстань, ніж промені з модою низьких порядків, вони просуваються доволі швидко, тому що проходять через частину серцевини з малим коефіцієнтом заломлення. В наслідок чого швидкість променів з різними модами уздовж осі волокна приблизно однакова. Тому часова різниця в поширенні світлових променів з модами найбільшого і найменшого порядку для градієнтних волокон менша, ніж для ступінчастих, і записується як

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док-м	Підпис	Дата		18

$$\delta\tau \approx \frac{n_1 L}{c} \frac{\Delta^2}{2} \quad (1.10)$$

Враховуючи формули, можна побачити, що різниця в часі поширення для градієнтного волокна порівнюючи з різницею для ступінчастих волокон менша в $\Delta/2$ разів. Маємо формулу

$$BL = \frac{2c}{n_1 \Delta^2} \quad (1.11)$$

В багатомодових волокнах в наслідок поширення світла у вигляді декілька сотень мод, то його поляризація випадкова, і в цих волокнах неможливо використовувати фазу світла або поляризацію. Отже тому використовують такий тип волокон в датчиках для виміру характеристик ефектів, при яких змінюється інтенсивність світла.

Одномодові волокна мають діаметр серцевини не більше

10мкм, відносну різницю коефіцієнтів заломлення в них приблизно 0,3%. Оболонка має діаметр 125 мкм і складається з матеріалу з легуючими добавками, які змінюють показник заломлення. Такі волокна проектується, щоб їх нормована частина v була меншою ніж 2,4 В. У одномодових волокнах відсутня тимчасова різниця в поширенні мод, на відмінну від багатомодових, тому вони надзвичайно широкосмугові (в декілька десятків разів, а то і сотень раз більше) порівняно з градієнтними. Основним фактором, що обмежує ширину смуги одномодових волокон є зміна коефіцієнту заломлення матеріалу для різних по довжині хвиль, в результаті чого ширина полоси обернено пропорційна ширині спектра джерела світла.

В одномодових волокнах можуть використовуватись фаза та поляризація, що для застосування цих волокон в датчиках дуже цінно. В цих волокнах симетричною відносно осі форми (Рис. 1.3 , в) але практично існують дві окремі моди с поляризацією за двома ортогональними

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док-м	Підпис	Дата		19

напрямками в площині поперечного перерізу волокна (в цих напрямках складові електричного поля орієнтовані). Моді в цих

напрямках поляризації позначаються як HE_{11}^x і HE_{11}^y (рис. 1.4). отже коли ідеально симетрична хвилевідна структура волокна, тоді обидва мода з ортогональною

поляризацією повинні мати однакове постійне поширення і не розрізняються. Саме тому такі волокна називають одномодовими.

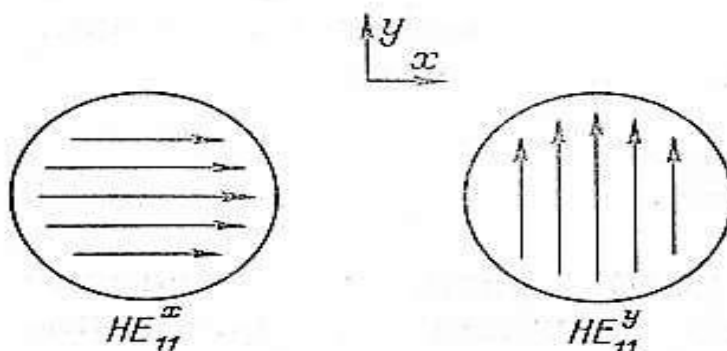


Рис. 1.4. Моді з ортогональною поляризацією в одномодовому оптичному волокні

Але в реальних оптичних волокнах в наслідок ексцентриситету перетину та еліптичності серцевини виникає осьова асиметрія, при якій постійні поширенні двох ортогональних мод будуть різними. Крім того, на практиці в одномодових волокнах при збуреннях через температурних коливань та вигинах волокна відбувається взаємне перетворення мод HE_{11}^y і HE_{11}^x а також змінюється поляризації світла. Отже, при використанні ОВД для вимірювань, поляризації і основаних інтерференції, його вихідний промінь внаслідок збурень, не пов'язаних із самим вимірюванням, відчуває флуктуації, які знижують точність вимірювання. Вирішити цю проблему може, використання волокна з подвійним променезаломленням. Яку називають також волокном з єдиною поляризованої хвилею чи волокном зі стійкою поляризацією хвиль.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Підпис	Дата		20

Подвійне променезаломлення — явище поширення в анізотропному середовищі електромагнітних хвиль з однаковою частотою, але різною довжиною хвилі й швидкістю.

В звичайних одномодових волокнах при введенні світла з лінійною поляризацією виникають зв'язки між модою HE_{11}^y та модою HE_{11}^x , що зображено на рис.1.5, флуктуаціями діаметра серцевини уздовж волокна ушкодженнями зовнішніх збурень.

Це приводить до того, що поляризація світла на виході носить випадковий характер. Якщо флуктуації діаметра серцевини уздовж волокна та інші зовнішні збурення мають просторову частоту відповідно різниці постійних поширення двох мод $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$, тоді між модами виникає сильний зв'язок, і чим більша частота, тим степінь зв'язку вища.

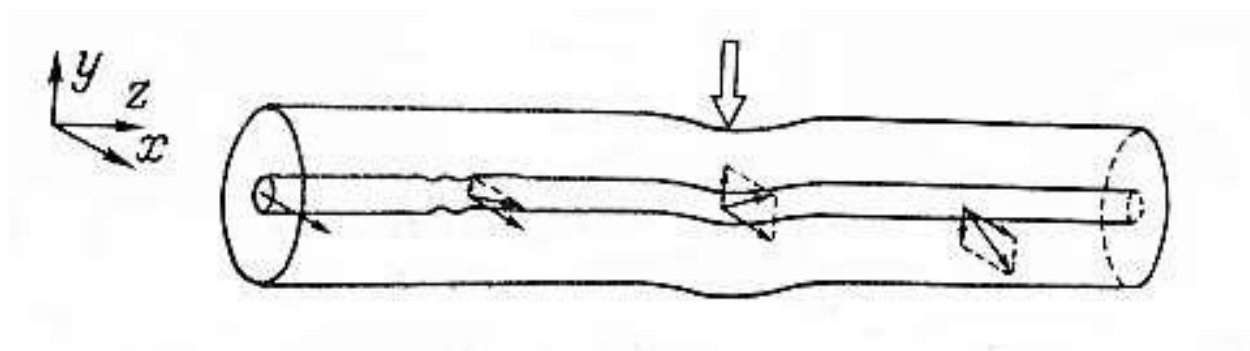


Рис. 1.5. Зміни хвильовидної структури та вплив зовнішніх збурень на кут поляризації

Існують два типи оптичних волокон з подвійним променевими заломленням:

- 1) волокно напруженого типу, в якому різниця $\Delta\beta$ виникає в результаті асиметричного розподілу механічної напруги в серцевині волокна (подвійне променеве заломлення, яке обумовлене механічною напругою).
- 2) волокно з розподіленням, з асиметрією розподілення, коефіцієнта заломлення, що викликає різницю $\Delta\beta$ (подвійне променеве заломлення, яке обумовлене геометрією)

На рис 1.6 представлені перерізи типових ОВ з подвійним променевим заломленням. Волокна на рис 1.6, а та б це тип з розподілом коефіцієнта заломлення, на рис. 1.6 в та г – напружений тип.

Потрібно відмітити, що в волокнах з розподілом коефіцієнта заломлення виникає також асиметрія напруги серцевини, іншими словами «чистого» типу волокна з розподілом коефіцієнта заломлення не буває. Основними параметрами ОВ з подвійним променевим заломленням є довжина інтерференційного биття, створюваного модою HE_{11}^x та модою HE_{11}^y

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{B}, \quad (1.12)$$

та коефіцієнт подвійного променезаломлення мод:

$$B = \Delta\beta/k, \quad (1.13)$$

та дисперсія моди поляризованої хвилі

$$\tau \approx B/c. \quad (1.14)$$

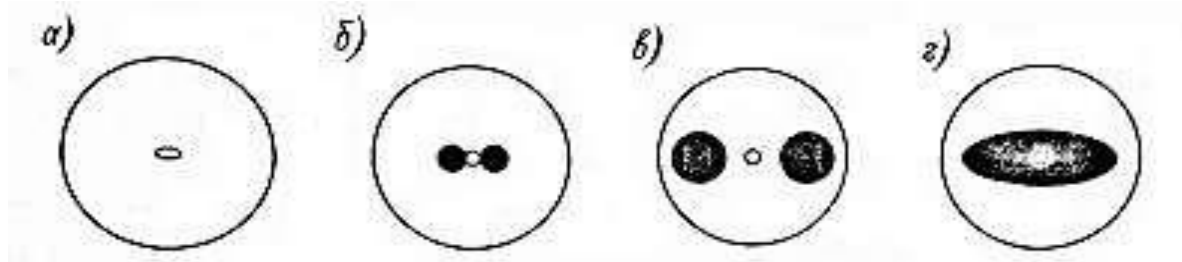


Рис. 1.6. Оптичне волокно з подвійним променезаломленням: з еліптичною серцевиною (а); з боковими виїмками або тунелями (б); – з збереженням поляризації і заниженим поглинанням (PANDA) (в); з еліптичною оболонкою (г)

1.2. Типи волоконно-оптичних датчиків.

Інтерферометричні датчики. На рис. 1.7 представлено структури волоконно-оптичних інтерферометрів, зокрема на рис. 1.7, а та б, – структури, які важливі для волоконно-оптичних гіроскопів. Вони створюють єдину систему. В інтерферометрах Маха – Цендера для чутливого елемента, інші – для опорного сигналу. Інтерферометри з поляризованими модами та інтерферометри Фабри – Перо виконануються

на одному оптичному волокні та розробляються з урахуванням використання особливостей волокна.

В структурах інтерферометрів інтенсивність інтерференції P_1 та P_2 при інтенсивності двох або світлових хвиль I_1 та I_2 , за виключенням інтерферометрів Фабрі – Перо, (на рис 1.9, е) виражається наступним чином:

$$P_1 \approx I_1 + I_2 + \gamma * 2\sqrt{I_1 I_2 \cos \psi}, \quad (1.15)$$

$$P_2 \approx I_1 + I_2 - \gamma * 2\sqrt{I_1 I_2 \cos \psi}, \quad (1.16)$$

γ – степінь когерентності інтерферуючих хвиль.

В попередніх формулах для двох інтерференційних вихідних сигналів P_2 та P_1 знаки при $\cos \psi$ протилежні. Це дотримується, коли направлений розгалужувач, який об'єднує обидва світлових променя, чи світлоподільник поляризованих променів не має втрат. Зазвичай світло з інтенсивністю $I_1 + I_2$ передається за двома оптичними шляхами повністю, це добре ілюструє закон збереження енергії.

Різниця фаз ψ між двома світловими хвилями можна представити у вигляді дрейфу ψ_d та фази вхідного сигналу ψ_s в низькочастотній області, викликаного в основному коливанням температури:

$$\psi = \psi_d + \psi_s, \quad (1.17)$$

Нажаль важко усунути вплив коливань температури, тому в якості сигналу, використовуваного в волоконно-оптичному інтерферометричному датчику, приймається тільки змінна складова, розташована вище частотної смуги температурного дрейфу. Але, це обмеження неприйнятно при розробці датчика температури і не підходить для оптичної системи з волокном опорного сигналу. В цих випадках використовується інтерферометр на одному оптичному волокні (рис. 1.9, в і г).

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		23

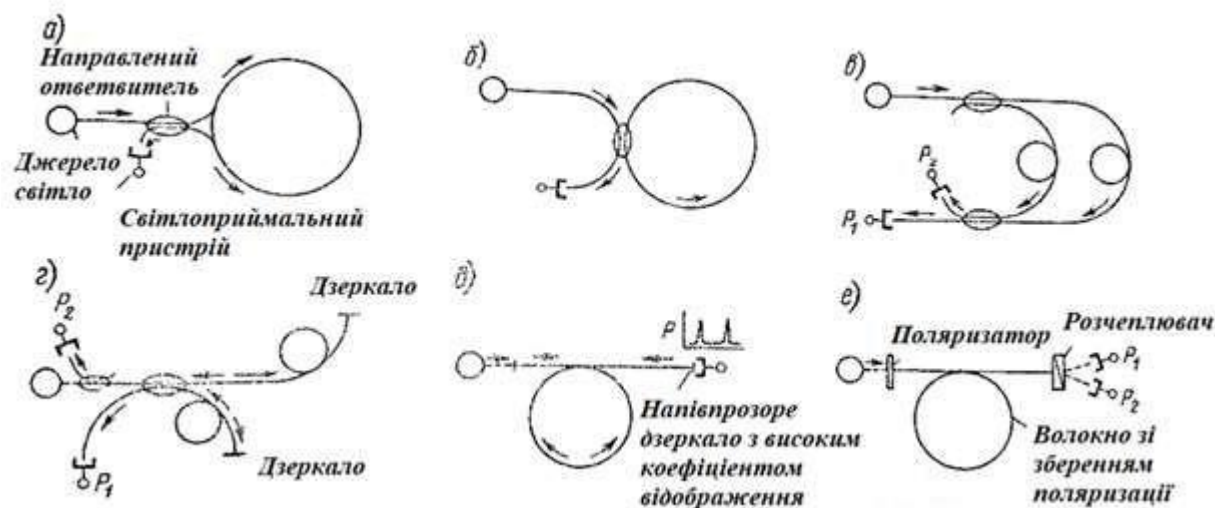


Рис. 1.7. Схеми волоконо-оптичних інтерферометрів:
 кільцевого (а); кільцевого Фабрі-Перо (б); Маха-Цендера (в); Майкельсона
 (г); Фабрі-Перо (д); з поляризованими модами (е)

Датчики поглинання світла напівпровідником. На рис. 1.7 зображена структура і описується принцип роботи температурног датчика, робота цього датчика базується на оптичних властивостях напівпровідників GaAs та ін. Напівпровідник має граничну довжину хвилі λ_g спектра оптичного поглинання (мал. 1.7, а) а також для світла з коротшою довжиною, ніж λ_g , збільшується поглинання, гранична довжина хвилі λ_g зсувається в бік довших хвиль по мірі зростання температури. Якщо напівпровідниковий кристал затиснути між приймальним та передавальним оптичними волокнами (рис.1.7, б) та подати промінь на нього від джерела світла, спектр випромінювання якого знаходиться в околиці зазначеної границі спектра поглинання, тоді інтенсивність світла, яка проходить через датчик, з підвищенням температури буде падати. Таким чином, можна виміряти температуру по вихідному сигналу датчика.

Структурна схема датчика представлена на рис. 1.7, в. В якості термочутливого матеріалу використано GaAs (арсенід галію), в якості джерела вимірювального сигналу світлодіод на основі AlGaAs (арсеніду

галіюалюмінію), в якості джерела опорного сигналу світлодіод на основі InGaAsP (арсеніду-фосфіду індію-галію), світлодіоди генерують імпульси, трохи зміщені у часі, однакової амплітуди. Коли крізь кристал арсеніду галію (термочутливий елемент) проходить вимірювальний імпульс, то амплітуда його зменшується пропорційно зміні температури кристала.

Використовують багатомодове оптичне волокно в даному датчику з тефлоновою оболонкою. Подібні датчики знайшли застосування для вимірювання температури обмотки високовольтного трансформатора в робочому режимі та температури проводів ліній електропередач.

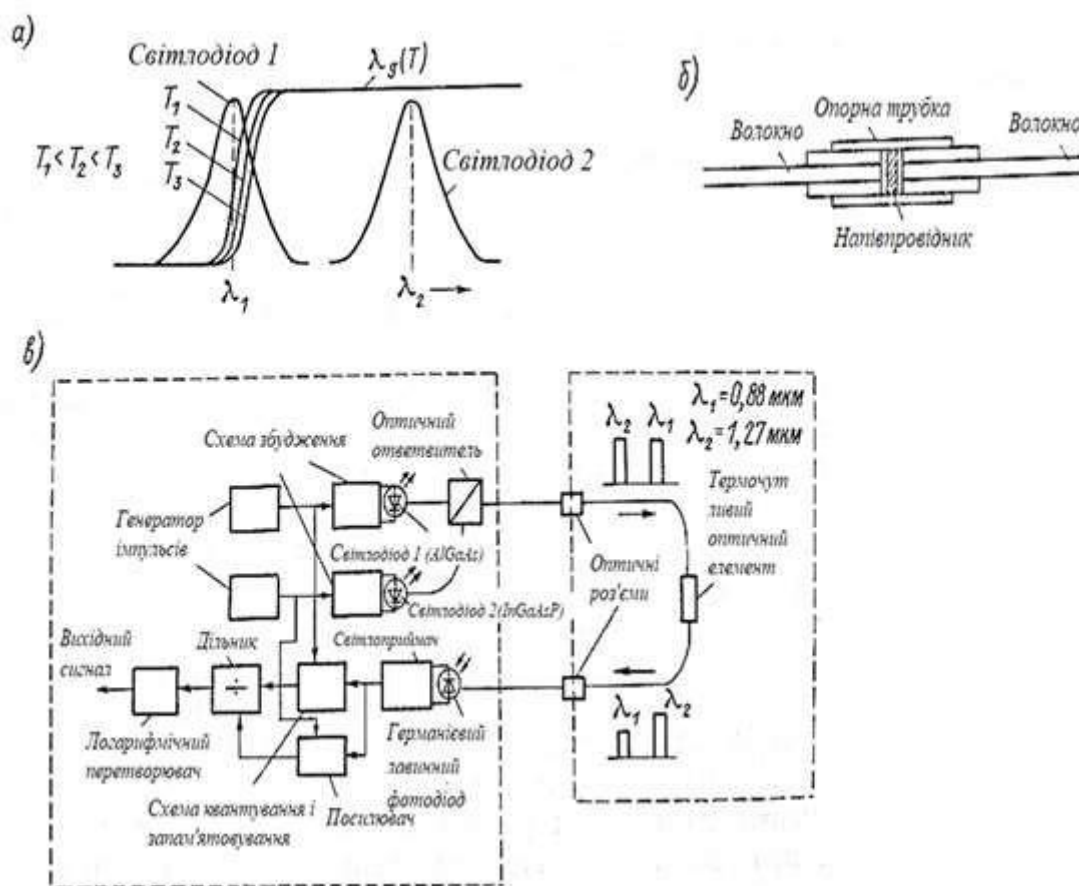


Рис. 1.7. Датчик температури на основі поглинання світла напівпровідником

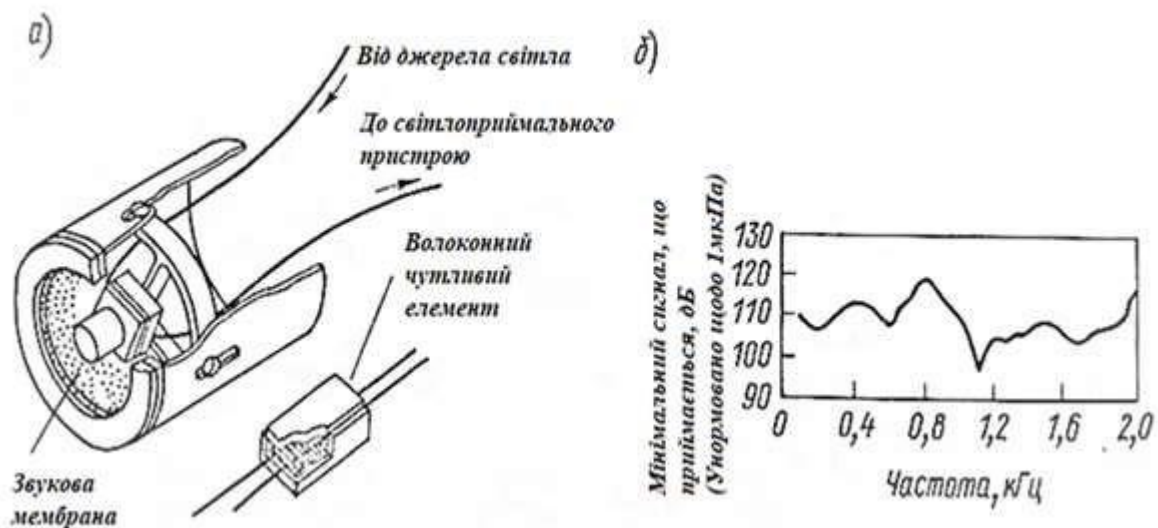


Рис. 1.8. Датчик температури на основі поглинання світла напівпровідником

Датчики на мікровигинах волокна. На рис. 1.8, а представлено загальний вигляд датчика гідрофона (акустичних коливань), в якому використовується ефект зміни оптичних втрат, тобто втрат на мікровигинах волокна. Вони виникають внаслідок впливу зовнішніх факторів на періодичне вигинання волокна. В гідрофоні, завдяки конструкції волоконно-оптичного роз'єму, коливання мембрани під дією звукової хвилі викликають зміну амплітуди вигинів волокна. На рис. 1.8, б представлена характеристика чутливості, яка дає можливість виявлення звукового тиску приблизно 0.1 Па. Однак, при періодичних коливаннях на ось волокна та боковому тиску між модами виникає обмін енергією у відповідності з періодом цих коливань. У такому випадку використовується перетворення мод між випромінюваними і каналізованими світловими хвилями. У результаті цього встановлено, що з квадратичним розподілом коефіцієнта заломлення багатомодове волокно має підвищену чутливість до втрат на мікровигинах. Вивчається можливість застосування цього волоконно-оптичного датчика в якості тензометра.

Бреггівські датчики. Оскільки датчик на бреггівських ґратах є достатньо новим, не достатньо дослідженим типом датчиків, який має великі можливості для контролю розподілених параметрів. Цей датчик може вимірювати декілька фізичних параметрів, але зосередимося на вимірюванні лише напружень у деформованих конструкціях. Прикладами можуть бути арки та прольоти мостів, балки у будівельних спорудах та ін. Щоб реалізувати такі вимірювання ОВ з множиною бреггівських ґрат, з різним періодом, закріплюють на конструкції, та реєструють спектри випромінювання, відбитого від кожної окремої ґратки, освітлюючи їх широкопasmовим джерелом випромінювання. Чим напруження елемента конструкції більше, тим сильніше розтягується волокно і тим більше зміщення спектра відбитого випромінювання.

Волоконна бреггівська ґратка це ділянка оптичного волокна, в серцевині якого показник заломлення, в поздовжньому напрямку, періодично змінюється (рис. 1.10).

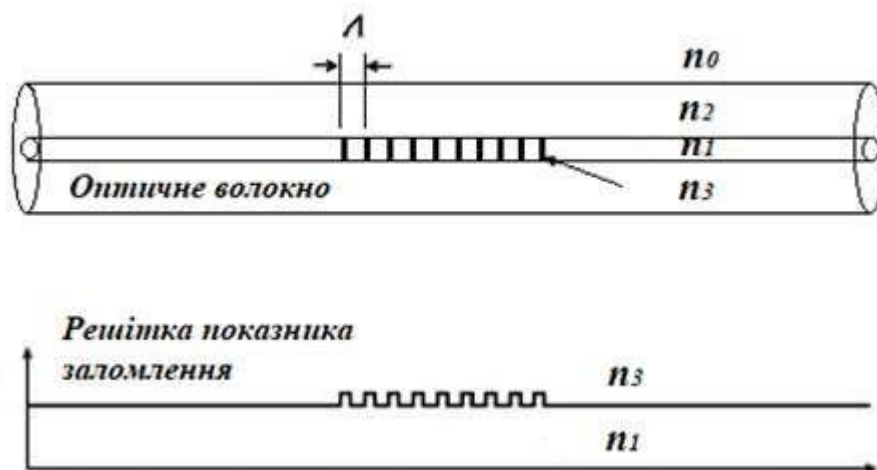


Рис. 1.10. Волоконна бреггівська ґратка

Випромінювання, яке поширюється по ОВ, являє собою комбінацію власних мод світловоду: направляючих і випромінювальних. Направляючі відповідають дискретного набору постійних поширення β_i , а випромінювальні моди формують безперервну функцію. Якщо відсутні зміни в показнику заломлення, то моди поширюються без взаємодії один з

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		27

одним. Тому період модуляції показника заломлення вибирається так, щоб забезпечити необхідну резонансну взаємодію між модами світловода. Ця модуляція показника заломлення пов'язує основну моду з модою, яка розповсюджується у зворотному напрямку. В результаті цього, на дискретній довжині розповсюджується хвилі по ОВ, випромінювання відбивається від волоконної брегівської ґратки. Від глибини модуляції показника заломлення залежить коефіцієнт відбиття, центральна довжина відбитої хвилі визначається умовою Бреґга.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.18)$$

λ_B - довжина хвилі брегівського резонансу, n_{eff} - ефективний ПЗ серцевини волокна для центральної довжини хвилі, Λ - період брегівської ґратки.

Світло, яке поширюється в серцевині ОВ, розсіюється кожною гранню ґратки показника заломлення. Якщо не виконуються умови Бреґга, то світло, відбите від кожної грані ґратки, не потрапить в фазу, і в кінці загасає. Для довжин хвиль, що відповідають умові Бреґга, внески відбитого світла від кожної грані показника заломлення поширюються та складаються в зворотному напрямку.

2. АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ ДАТЧИКІВ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ

2.1. Властивості бреггівських ґраток

Однорідна ґратка Бреґга, сформована в серцевині ОДВ із середнім показником заломлення n_0 . Профіль показника заломлення може бути виражений як:

$$n(z) = n_0 + \Delta n * \cos(2\pi x / \Lambda), \quad (2.1)$$

Δn - амплітуда модуляції показника заломлення БГ, Λ – період БГ, x - відстань вздовж осі волокна. Згідно з теорії пов'язаних мод сформуємо функцію спектра відбиття ґратки Бреґга:

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sin^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s \cosh^2(sl)}, \quad (2.2)$$

$R(\lambda, l)$ – коефіцієнт відбиття ґратки це функція від довжини хвилі λ і довжини ґратки l , Ω - коефіцієнт зв'язку, $\Delta k = k - \pi/\lambda$ - хвильовий вектор розладу,

$$k = 2\pi n_0 / \lambda, \quad s = 2\pi n_0 / \lambda - \pi / \lambda - \text{постійна поширення та } s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2.$$

Для синусоїдальної функції модуляції показника заломлення коефіцієнт зв'язку виражається:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda}, \quad (2.3)$$

$\eta(V) \approx 1 - 1/V^2, (V \geq 2,4)$ - це функція, яка визначає відсоток інтенсивності основної моди в серцевині. Для бреггівської довжини хвилі $\Delta k = 0$, вираз записується:

$$R(\lambda, l) = \tanh(\Omega l), \quad (2.4)$$

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Підпис	Дата		29

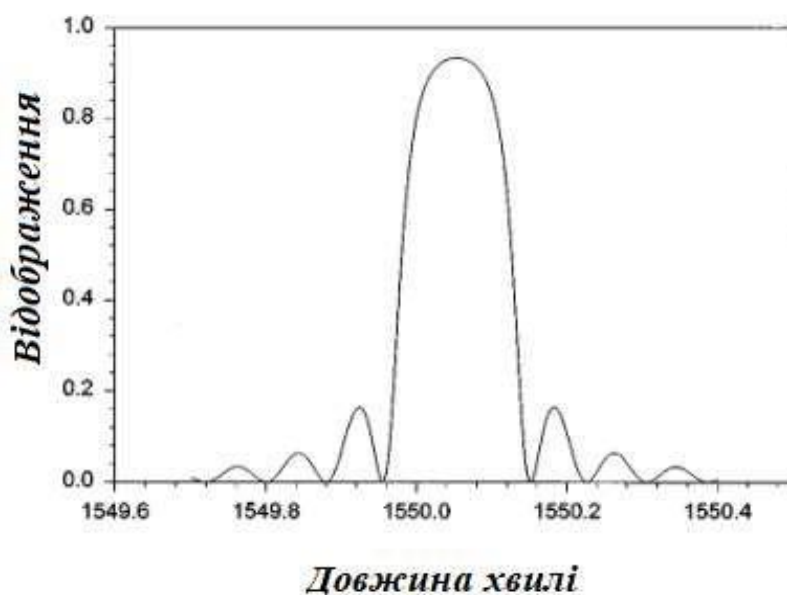


Рис. 2.1. Розрахунковий спектр відбиття волоконної брегівської ґратки

Чим більше глибина модуляції показника заломлення всередині ВБГ, тим більше коефіцієнт їх відбиття. З формули (2.1) видно, що резонансна довжина хвилі волоконних брегівських ґрат залежить від ефективного показника заломлення світловоду та періоду модуляції показника заломлення:

$$\Delta n = \frac{\lambda_B}{\pi l} * \tanh^{-1}(\sqrt{r_{max}}), \quad (2.5)$$

r_{max} – коефіцієнт відбиття на центральній довжині хвилі брегівського резонансу ґратки. Так для волоконної брегівської ґратки, яка має брегівський резонанс на 1550 нм, з довжиною ґратки 15 мм та коефіцієнтом відбиття 10%, відповідно до формули (2.5) величина наведеної модуляції показника заломлення Δn становить $1,077 \times 10^{-5}$. Вираз для розрахунку ширини спектра відбиття ВБГ на половині висоти записується:

$$\Delta \lambda = \lambda_B * \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + (1/n)^2}, \quad (2.6)$$

n - число періодів ґратки. Параметр $\alpha = 1$ для ВБГ з відбиттям близько 100% (сильновідбивних), а для слабких відбивних ґрат $\alpha \approx 0,5$.

Резонансна довжина хвилі ВБГ залежить від періоду модуляції ПЗ та ефективного ПЗ серцевини світловоду. Ці два параметри залежать від деформуючих напруг і зовнішньої температури. Використавши формулу (1.18) зміщення центральної довжини хвилі відбиття під дією температури і деформації записати можна так:

$$\Delta\lambda = \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial n} + n \frac{\delta\Lambda}{\delta l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta\Lambda}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (2.7)$$

Перший доданок у формулі (2.7) показує вплив деформації на волокно. Його сенс полягає в зміні періоду ґратки та показника заломлення, який викликаний пружнооптичним ефектом. Його можна описати таким виразом:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B0}(1 - p_e)\varepsilon(z), \quad (2.8)$$

p_e - постійна ефективна пружнооптична, що визначається як:

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (2.9)$$

n - ПЗ серцевини, p_{11} та p_{12} - компоненти пружнооптичного тензора, а ν - коефіцієнт Пуассона. Для стандартного ОДВ з параметрами і $n = 1,482$, $\nu = 0,16$, $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, при довжині хвилі відбиття волоконних бреггівських ґрат $\lambda_{B0} \approx 1550$ нм, при відносному подовженні $\varepsilon(z) = 10^{-6}$ розрахункова чутливість до деформації становить 1,2 пм.

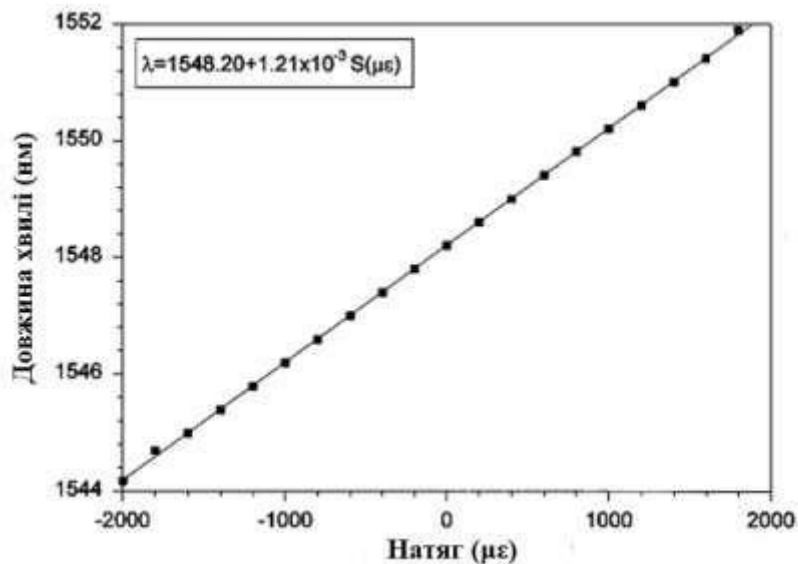


Рис. 2.2. Залежність зміщення брегівської довжини хвилі від прикладеної деформації

Результати експериментальних досліджень зсуву брегівської довжини хвилі відбиття від деформації представлені на рис. 2.2.

Другий доданок у формулі (2.7) це температурний вплив на БГ. Через температурне розширення кварцу відбувається зсув брегівської довжини хвилі, що викликає зміну періоду ґратки та ПЗ волокна. При зміні температури ΔT це зміщення λ_B може бути записано як:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (2.10)$$

$\xi = (1/n) (\delta n / \delta T)$ - термооптичний коефіцієнт, $\alpha = (1/\Lambda) (\delta \Lambda / \delta T)$ - коефіцієнт термічного розширення. Зміна показника заломлення є домінуючим ефектом. З виразу (2.10) можна розрахувати, що в одномодовому оптичному волокні температурний зсув ґратки Брегга становить $\sim 13,7$ пм/°С. На рис 2.2. показана температурна залежність резонансної довжини хвилі ВБГ:

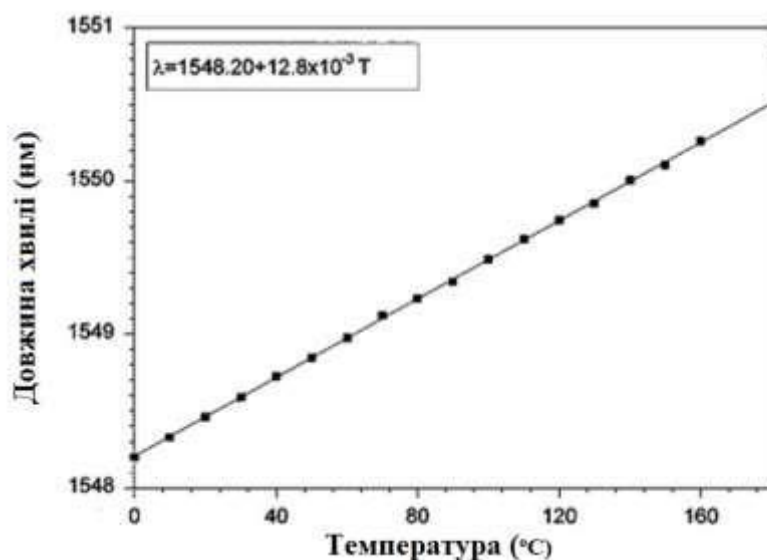


Рис. 2.2. Залежність довжини хвилі резонансу волоконної бреггівської ґратки від температури

Існує велика кількість різних способів побудувати сенсорні системи на основі бреггівських ґраток. Сенсорна система являє собою точковий датчик (у найпростішому випадку), з'єднаний через оптичний розгалужувач з джерелом світлового сигналу і блоком аналізатора (рис. 2.3.). Від джерела сигнал відбивається чутливим елементом. Довжина хвилі відбиття фіксується блоком аналізатора.

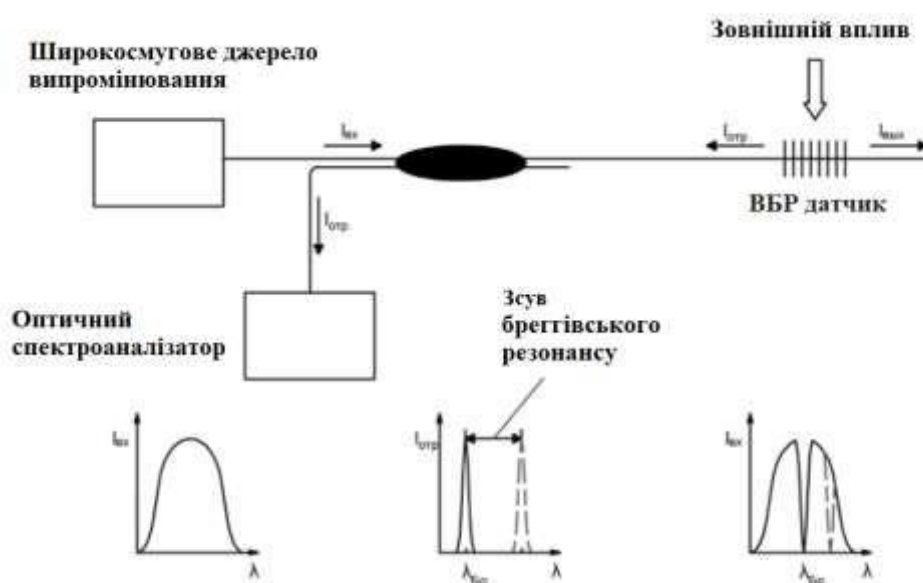


Рис. 2.3. Схема найпростішого ВОД на бреггівських ґратах

Аналізатор, як правило, являється вузькосмуговим спектрометром. Спектрометри існують різних типів: від аналізаторів на основі

інтерферометра Фабрі-Перо, до стандартних дифракційних, де в якості дисперсійного елемента використовується дифракційна ґратка.

Одним з основоположних переваг ВОД є легка можливість мультиплексування, об'єднання в масиви. Найчастіше в датчиках на БГ використовуються два види мультиплексування - мультиплексування за часом (Time Division Multiplexing TDM) і мультиплексування по довжині хвилі

(Wavelength Division Multiplexing - WDM).

Мультиплексування за часом засноване на аналізі швидкості проходження сигналу по системі. Датчик розділений ділянкою волоконного світловода, для якого сигналу потрібен певний час для проходження. Джерело посиляє в систему короткий імпульс. На виході сигнал являє собою, диференційованих за часом ряд імпульсів, кожен з яких несе інформацію про стан окремо кожного сенсора. Така система мультиплексування, чистому вигляді, рідко використовується для об'єднання ВБД, але зустрічається досить часто як складова частина більш складної системи.

Принцип (Wavelength Division Multiplexing) мультиплексування базується на тому, що кожен сенсорний елемент записується зі своїм унікальним періодом ґратки, що дозволяє фіксувати показання кожного сенсора окремо. В основному кількість сенсорів в масиві обмежується динамічним діапазоном аналізатора та спектральної шириною джерела.

2.2. Волоконна бреггівська ґратка як чутливий елемент

Чутливим елементом у фазових інтерферометричних датчиках (ФІД) на основі масивів волоконних бреггівських ґрат виступає саме опотичне волокно, яке веде до значного зниження собівартості. Інтерферометр Фабрі-Перо це відрізок ОВ між двома ґратками. Під впливом акустичних коливань та деформації змінюється різниця фаз сигналів від двох сусідніх

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		34

БГ. Найбільшу чутливістю до зміни довжини відрізка волокна під впливом зовнішніх чинників мають інтерферометричні датчики. Принцип роботи розподілених волоконно-оптичних вимірювальних комплексів на основі фазових інтерферометричних датчиків в найпростішому випадку (одного ФІД) (Рис. 2.4.) полягає в наступному. Кожна з ґраток РБ1 і РБ2 датчика відображає імпульс, який надходить на неї від імпульсного лазера, на однаковій довжині хвилі Брегга. Між відбитими імпульсами тимчасова затримка дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика - укладеному між ґратками волокні.

В компенсуючий інтерферометр (КІ) надходять вже відбиті імпульси де, він роздвоює кожен з них. Вноситься затримка в поширення імпульсів другим плечем компенсуючого інтерферометра по відношенню до першого плеча, це забезпечує перекриття імпульсу в часі, відбитого від РБ1, на виході другого плеча і імпульсу, відбитого від РБ2, на виході першого плеча і зсув їх по фазі відповідає $\varphi_0 = \pi/2$.

В результаті зовнішнього впливу зміна в часі деформації чутливого елемента датчика викликає зміну різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Фотоприймач (ФП) перетворює останнє в зміну величини струму. Роботу фотодетектора на ділянці максимальної крутизни забезпечує додатковий зсув фаз $\varphi_0 = \pi/2$ між інтерферуючими імпульсами, а максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача дозволяє отримати рівність інтенсивностей інтерферируючих імпульсів.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		35

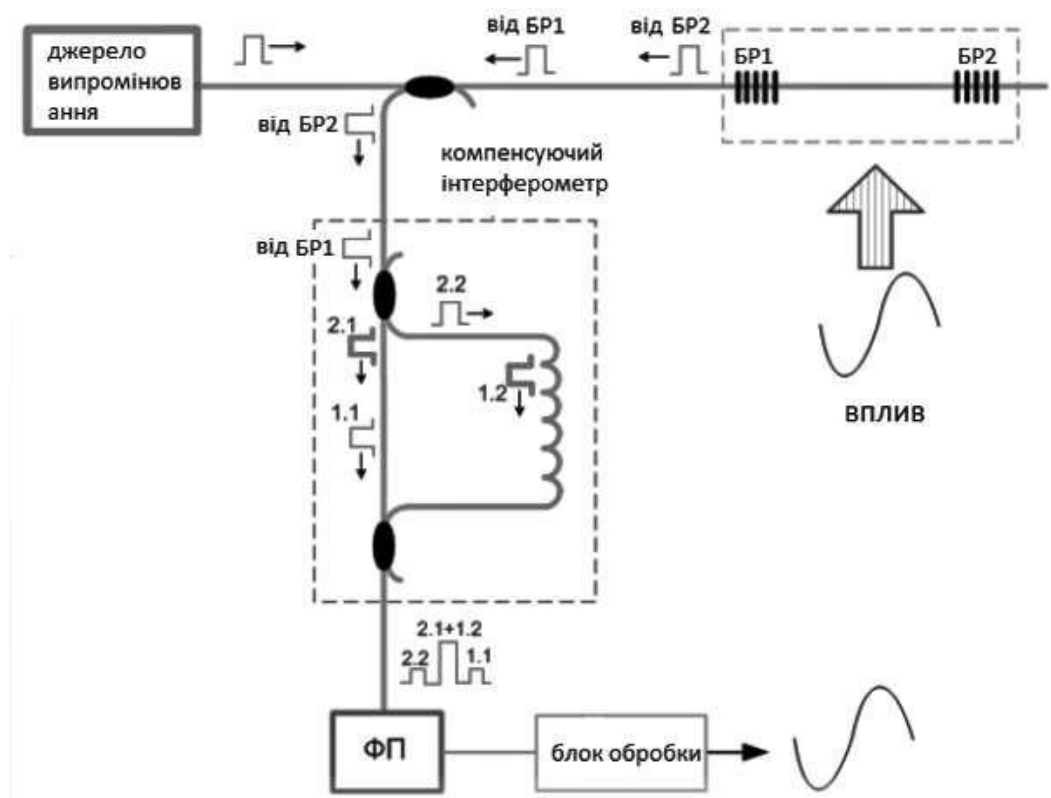


Рис. 2.4. Принцип дії волоконно-оптичної системи вібро-акустичного моніторингу на основі БГ.

Для створення, на одному волокні, масиву датчиків використовується тимчасове, якщо у брегівських ґратках однакова довжина хвилі відбиття, і спектральне ущільнення, якщо датчики складаються з БГ, у яких довжинах хвиль відбиття різні. Використання ВБГ для формування фазових інтерферометричних датчиків дозволяє об'єднувати велику кількість сенсорів в одному кабелі, розрізняючи сигнали від окремих гідрофонів по тимчасовій затримці та довжині хвилі.

2.3. Джерело випромінювання для брегівського датчика

Для ВОД на брегівських ґратах потрібне джерело випромінювання з значною потужністю і широким спектром.

Цим джерелом випромінювання є напівпровідниковий світлодіод.

Світлодіод (LED) - це напівпровідниковий прилад, що перетворює електричний струм в світлове випромінювання. від матеріалу з якого виготовлений світлодіод залежать довжина хвилі випромінювання та його характеристики. Чим світлодіод більш «синій», тим вища буде енергія квантів і тим більша ширина забороненої зони.

якщо до нього прикладена напруга в прямому напрямку (до анода - плюс, а до катода – мінус), то світлодіод випромінює світло. Мінімальна напруга випромінювання світла світлодіодом, залежить від його матеріалу. В таблиці.1. приведені значення напруг світлодіодів.

Таблиця 1.

Колір світлодіодів	Матеріал світлодіодів	Гранична довжина хвилі, нм	Пряма напруга при струмі 20 мА	
			Типові значення, В	Діапазон, В
	GaAs, GaAlAs	870 - 940	1.2	1.1 - 1.6
Червоний	GaAsP, GaP, AlInGaP	610 - 640	2.0	1.5 - 2.6
Помаранчевий	GaAsP, GaP, AlGaInP	600 - 630	2.0	1.7 - 2.8
Жовтий	GaAsP, AlGaInP, GaP	580 - 600	2.0	1.7 - 2.5
Зелений	GaP, InGaN	500 - 560	2.2	1.7 - 4.0
Блакитний	ZnSe, InGaN	460 - 470	3.6	3.2 - 4.5
Білий	Синій/УФ діод з люмінофором	Широкий спектр	3.6	2.7 - 4.3

Видно, що білі та блакитні світлодіоди потребують найбільшу напругу, а червоні і інфрачервоні - найменшу. Людським оком не помітно випромінювання інфрачервоного світлодіода, тому не використовують такі світлодіоди як індикатори. Вони використовуються найчастіше в різних датчиках, підсвітках відеокамер.

Взаємозв'язок між напругою і струмом світлодіода характеризує його вольт-амперна характеристика. В залежності від умов рекомбінації і типу переходу носіїв форма кривих $I = f(U)$ може бути різною.

Для переходів з ділянкою об'ємного заряду W рекомбінацією і генерацією носіїв у цій ділянці можна знехтувати, і рівняння вольт-амперної характеристики має звичайний вигляд:

$$I = I \exp\left[\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1\right], \quad (2.10)$$

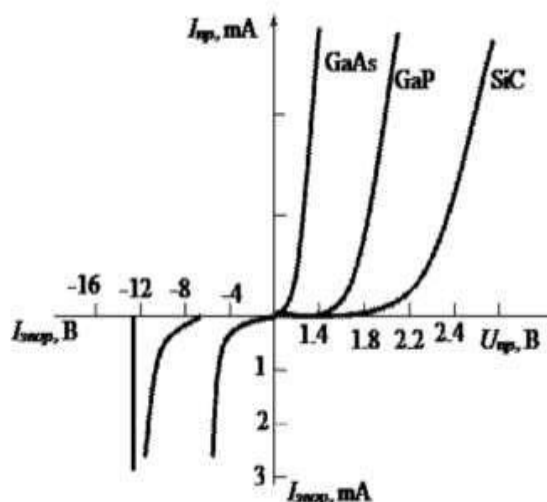


Рис. 2.5. Вольт-амперна характеристика різних світлодіодів

з різницею ширини забороненої зони напівпровідникових матеріалів пов'язані відмінності в прямих вітках ВАХ світлодіодів (Рис. 2.5). Чим менша довжина хвилі випромінювання, тим спад напруги на випромінюючому діоді більший як і втрати електричної енергії в ньому. Зворотні вітки вольт-амперних характеристик мають малу допустиму напругу, так як незначна ширина р-п-переходу у випромінюючих діодах. В схемах з високими зворотними напругами з випромінюючим діодом необхідно увімкнути послідовно звичайний діод, що має значення достатнє від допустимої зворотної напруги.

Матеріалом напівпровідників, рівнем легування і механізмом випромінювальної рекомбінації, типом легируючих домішок та шириною

забороненої зони визначається спектр випромінювання світлодіода. для виготовлення ефективних світлодіодів основними матеріалами є бінарні напівпровідникові сполуки $A^{III}B^V$ та їх тверді розчини. На рис. 2.3 представлені в відносних одиницях спектри випромінювання при кімнатній температурі деяких світлодіодів, які випускаються промисловістю.

Світлодіоди на основі арсеніду галію GaAs з шириною забороненої зони $\Delta E = 1,45 \text{ eV}$ володіють найбільшою ефективністю. Отже, GaAs на довжині хвилі $\lambda_{\max} = 1,24 / 1,4 = 0,9 \text{ мкм}$, що відповідає інфрачервоної області, спостерігається максимум спектральної характеристики випромінювання. При легуванні різними домішками, такі як телур, селен, літій і ін., що в забороненій зоні мають різні глибини залягання, світлодіоди можуть випромінювати в діапазоні $\lambda_{\max} = 0,9 \dots 0,96 \text{ мкм}$. На GaAs Світлодіоди мають найбільш високу квантову ефективність ($\eta_{\text{зов}} = 10 \dots 30\%$). Важливо, що спектр фоточутливості найбільш поширених Si-фотодіодів випромінювання добре відповідає спектру GaAs-світлодіодів.

GaP фосфід галію має ширину забороненої зони $\Delta E = 2,25 \text{ eV}$, яка визначає довжину хвилі випромінювання $\lambda_{\max} = 0,56 \text{ мкм}$. Це відповідає зеленому кольору. Такі світлодіоди можуть випромінювати червоний, жовтий, зелений світло при легуванні домішками (N, O₂, Zn). Отже, світлодіоди на GaP призначені для роботи у видимій частині спектру. $\eta_{\text{зов}} = 7 \dots 0,7\%$.

Світловипромінюючі діоди на короткохвильову область видимого спектру, які працюють в синьому, фіолетовому та блакитному діапазонах, створені на основі GaN нітриду галію і гетеропереходів з використанням твердих розчинів $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ і $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$. На GaN світлодіоди дають випромінювання $\lambda_{\max} = 0,44 \text{ мкм}$, але з низькою ефективністю $\eta_{\text{зов}} = 0,5\%$.

Для досягнення цієї мети також застосовують SiC карбід кремнію.

Хоча такі діоди мають ще менший $\eta_{\text{зов}} = 0,01\%$, але вони володіють

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Підпис	Дата		39

високою температурною та тимчасовою стабільністю. На основі них створюють еталонні джерела випромінювання.

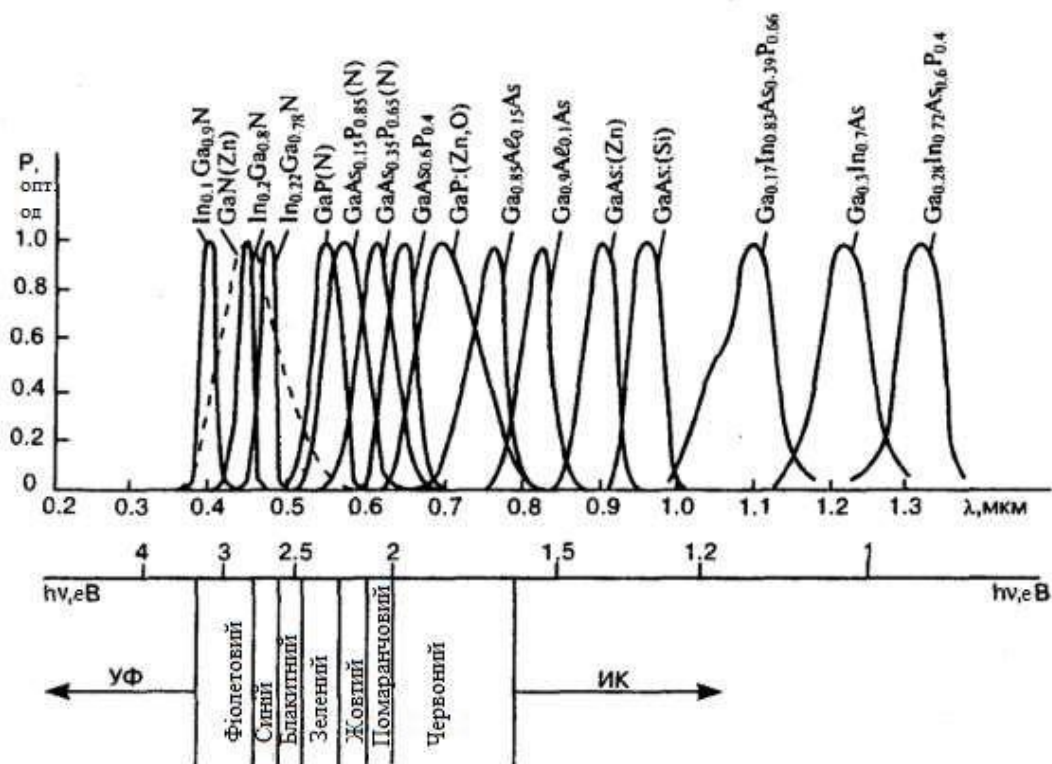


Рис. 2.6. Спектри випромінювання світлодіодів.

Для випромінюючих діодів як видимого, так і інфрачервоного випромінювання застосовують потрібні з'єднання, які виготовлені на з твердого розчину GaAlAs галій-алюміній-миш'яку. Застосовують і тверді розчини на основі InGaP індій-галій-фосфор та GaAsP галій-миш'як-фосфор. За узагальненим показником ($P_{\text{изл}}$) галій-алюміній-миш'як найбільш задовольняє вимогам оптоелектроніки. В такому матеріалі частина атомів Ga заміщається атомами Al. Ширина забороненої зони змінюється, у міру збільшення частки заміщених атомів, від $\Delta E = 1,45$ eV (GaAs) до $\Delta E = 2,16$ eV (AlAs). Такі світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі $\lambda_{\text{max}} = 0,6 \dots 0,9$ мкм, а саме генерувати випромінювання як інфрачервоної, так і у видимій області спектра.

Для цього матеріалу зовнішній квантовий вихід становить $\eta_{\text{зов}} = 1,2 \dots 12\%$.

Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ

Арк

40

2.4. Цифрова камера бреггівського датчика

На сьогоднішній день цифрова камера являється незамінним елементом в наукових, навчальних, промислових або клінічних лабораторіях. З кожним роком даний пристрій отримує все більш широке застосування, в результаті постійного розвитку нових технологій та функцій, від можливості зафіксувати спостережуваний зразок, закінчуючи відтворенням в тривимірній графіці мікрооб'єктів. Не зважаючи на широкий спектр своїх можливостей, вчені та інженери, які працюють зі складними задачами, їм часто зустрічається проблема динамічних процесів або реєстрації слабких сигналів, в чому sCMOS-камера нового покоління є лідиром.

До sCMOS-камери, ринок фототехніки займали лише пристрої, які використовують CMOS матрицю та пристрої на матриці CCD.

Матриця CCD – це мікросхема на кремнієвій основі яка складається з світлочутливих фотодіодів, що використовує технологію приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). CCD-матриці дуже ефективні в реєстрації світла та зменшенні шуму. Від підсилювача зчитування так і від слабого сигналу. Але, ПЗЗ-матриці це пристрій послідовного зчитування, що є одним з основних недоліків, при цьому дозволяє отримувати низькі шуми завдяки повільній швидкості зчитування. Коли є потреба отримати більш високу швидкість кадрів, то знижується динамічний діапазон або збільшується шум зчитування та зменшується роздільна здатність.

Матриця CMOS – це мікросхема на польових транзисторах з каналами різної провідності та ізольованим затвором, з середньою чутливістю вони можуть досягти достатньо високу частоту кадрів. У CMOS-матриці кожен окремий піксель має, пов'язаний з ним, підсилювач. Ряд пікселів може зчитуватися паралельно рядку, вибравши окремий піксель або адресу регістру за допомогою мультиплексора стовпчика.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Підпис	Дата		41

CMOS-матриця являється пристроєм паралельного зчитування та дозволяє досягти більш високих швидкостей зчитування, що дуже актуально для обробки зображень.

Передова технологія sCMOS це нове покоління матриці CMOS та розроблена спеціально для кількісного аналізу та візуалізації зображень в наукових дослідженнях. Матриці sCMOS мають більш високу квантової ефективності та більш низький рівень шумів, порівняно з CMOS. Адже це гібридна матриця, в якій поєднується CCD і CMOS - технології, забезпечує високу продуктивність, перевершує традиційні CMOS і CCD детектори. CMOS і CCD-пристрої були розроблені, щоб відповідати характеристикам зображення, який одержували за допомогою CCD-матриць з можливістю швидкосного зчитування з CMOS-матриць.

Матриця має роздвоєну схему зчитування, верхня і нижня половинки матриці зчитуються одне від одного незалежно. у кожній половині сенсора кожен стовпець оснащений двома аналогоцифровими перетворювачами (АЦП) та двома підсилювачами, це зображено на Рис. 2.7. Пара, що складається з двох АЦП та двох підсилювачів, має незалежні настройки посилення. Тобто, остаточне зображення відновлюється комбінуванням зчитування пікселя з обох каналів, з каналу низького і високого коефіцієнта посилення зчитування для широкого динамічного діапазону всередині кадру а також для маленького кроку пікселя. Кожен піксель на матриці має по 5 транзисторів (дизайн "5Т>"), тим самим дозволяючи використовувати режим " кадрового затвору ", виробляти горизонтальний анти-блюмінг (для зменшення засвічення) та подвійну корельовану вибірку (для зменшення шуму).

Технологія sCMOS буда основана на новому поколінні технології і дизайну КМОП-процесу. Сенсори з роздільною здатністю 5,5 Мп має велике поле зору, ставлячи під загрозу частоту кадрів або шум зчитування.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		42

Але у порівнянні з самими високопродуктивними CCD-матрицями, значення рівня шуму зчитування незначне. Навіть CCD-матриці з повільним скануванням не можуть досягти настільки низького рівня. Факт, який sCMOS сенсор робить унікальним на ринку, це те що він досягає значення



Рис. 2.7. Структура CMOS-камери

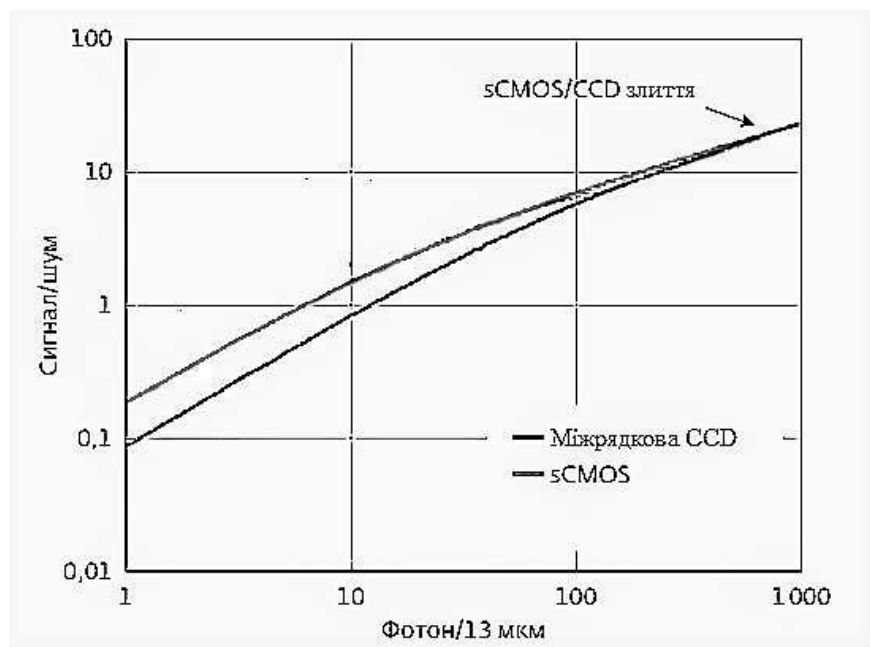


Рис.2.8 Порівняння співвідношення сигнал-шум для наукових камер Andor: sCMOSматриці, міжрядкової CCD-матриці.

середньоквадратичного шуму зчитування в 1 е-електрон при зчитуванні 5,5 Мп зображення зі швидкістю 30 кадрів/с. Крім того, він здатний досягти 100 кадрів в секунду зі середньоквадратичним шумом зчитування в 1.3 е-електрон. Для порівняння, найнижче значення рівня шуму CCD-камери при зчитуванні зображення розміром 1,4 Мп при швидкості 16 кадрів/с становить 10 е-. За допомогою вибору певної області можна отримати велику швидкість кадрів, так що досягається висока роздільна здатність при зміні поля зору.

Висновок

В даній главі проаналізовані елементи датчика на основі бреггівських ґрат, розглянуті: світлодіод, чутливий елемент, цифрова камера та їх характеристики. В якості чутливого елемента була вибрана волоконна бреггівська ґратка. Через те, що ВБГ представляє з себе селектуюче дзеркало, при випромінненні в оптоволокну від широкосмугового, такого, як світлодіод, джерела, світло відбивається з вузькою спектральної смугою з центром на довжині хвилі Бреґга. Світло, що залишається - продовжує свій рух в оптоволокну без зайвих втрат.

Світлодіоди знаходять широке застосування як кероване джерело живлення. У порівнянні з іншими джерелами світла світлодіоди мають велику кількість переваг: висока світлова віддача, механічна міцність, широкий спектр світла, світлодіоди - екологічно чистий продукт, мають малу вагу, невеликий розмір, невелику енерговитратність, довговічність і т.д.

За допомогою цифрової камери є можливість зафіксувати виміряні параметри на екрані комп'ютера, камера є дуже важливим елементом, тому необхідно підійти до цього питання серйозно. При виборі цифрової камери необхідно звернути увагу на такі параметри, як: низький рівень шумів, висока швидкість зчитування, енерговитратність,

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Підпис	Дата		44

компактність, невелика ціна, саме тому я рекомендую використовувати цифрову камеру нового покоління sCMOS.

3. ДАТЧИК З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ

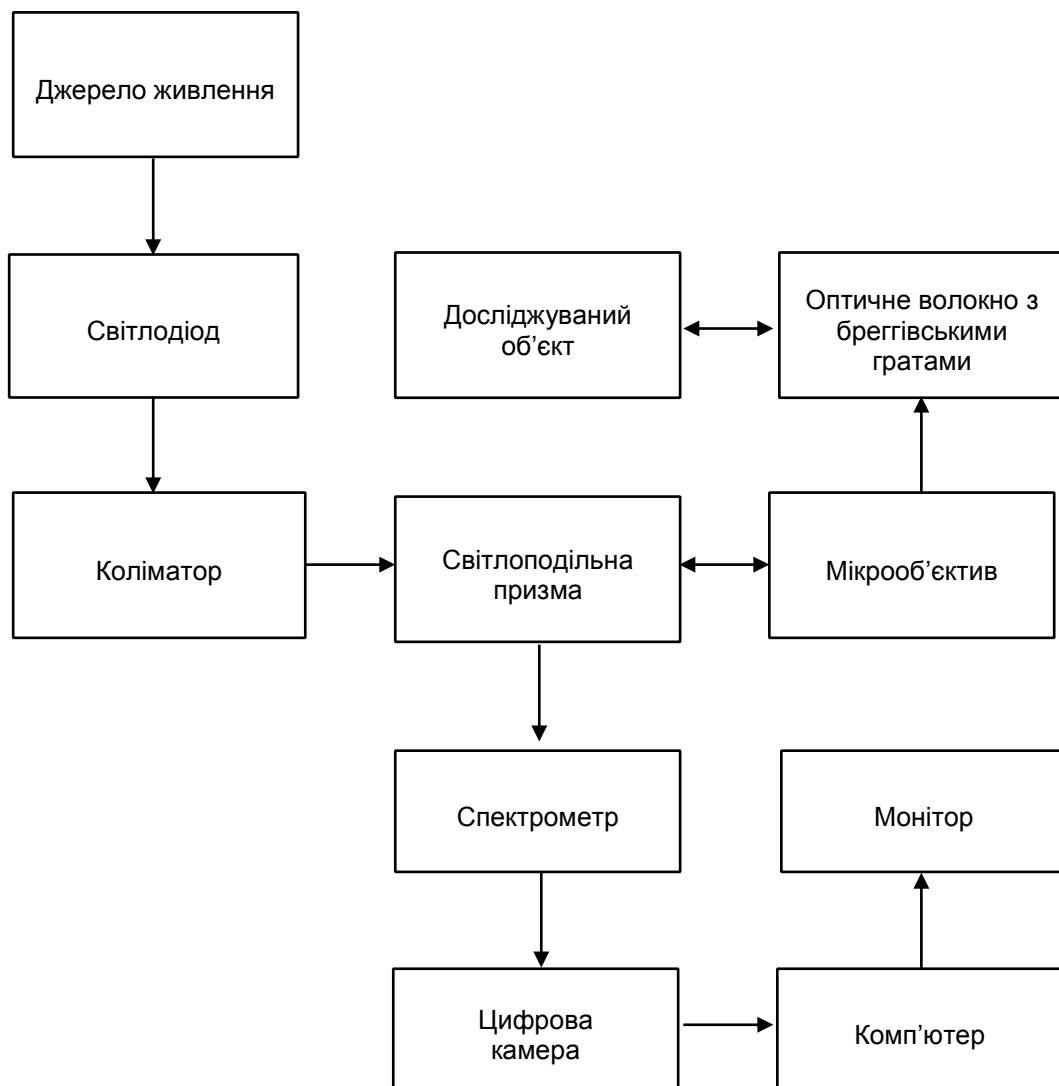
3.1. Структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами

На рис. 3.1 представлена структурна схема ВОД з розподіленими параметрами. Джерелом випромінювання в схемі являється світлодіод, що збуджується джерелом живлення. На коліматор спрямовується випромінювання світлодіода, що формує паралельний пучок світла. Цей пучок потрапляє на світлоподільну призму і мікрооб'єktiv, який вводить в оптичне волокно з бреггівськими ґратками випромінювання. Волокно жорстко зв'язане з досліджуваним об'єктом, так що деформація об'єкта призводить до стискання волокна або розтягування. Відбите від бреггівських ґраток волокна випромінювання повертається через мікрооб'єktiv на світлоподільну та спрямовується на спектрометр. За допомогою цифрової камери та комп'ютера спектрометр формує зображення спектральної лінії бреггівського розсіяння на екрані монітора.

а допомогою спеціалізованої програми комп'ютер розраховує величину теплової або механічної деформації волокна і зв'язує цю величину з механічним або тепловим впливом на досліджуваний об'єкт.

За для ефективної роботи бреггівських датчиків відрізки волокна довжиною 10 см з ґратами мають бути приклеєні до контрольованої конструкції за допомогою епоксидної смоли. У цих місцях з оптичного волокна потрібно зняти захисну полімерну оболонку.

					<i>ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ</i>	Апк
Змн	Апк	№ докum.	Піппис	Лата		45



3.1. Структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами

3.2. Вибір джерела випромінювання для датчика з розподіленими параметрами

Для забезпечення оптимальної роботи датчика з розподіленими параметрами джерело випромінювання повинне перекривати своїм спектром спектральні діапазони роботи усіх БГ. Найбільш придатним для цього є світлодіод (рис. 3.2).

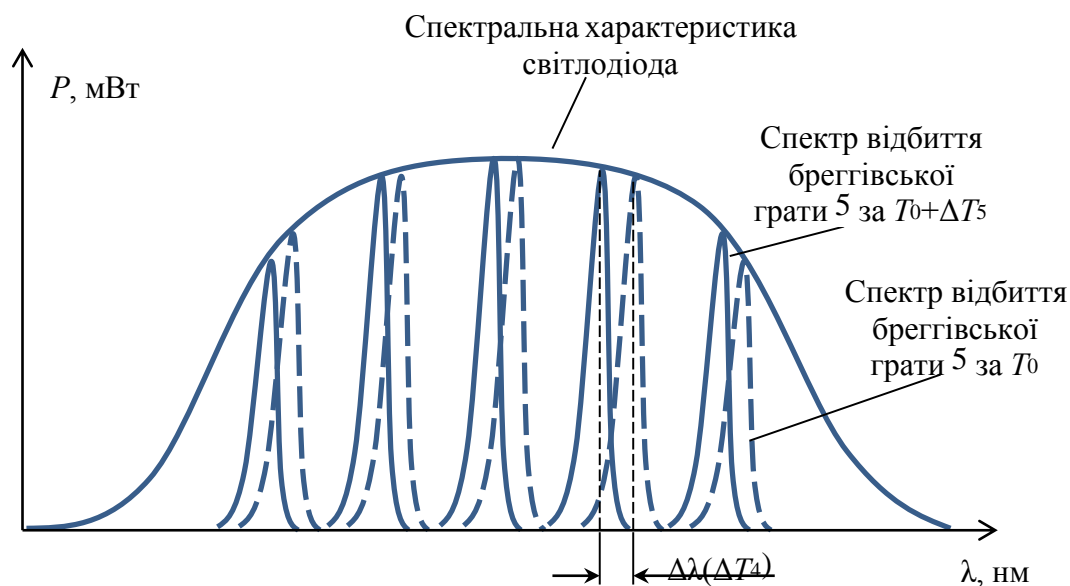


Рис. 3.2. Спектральна характеристика брегівського відбивача з розподіленими параметрами

На рис. 3.3 зображена спектральна характеристика світлодіода SFH 4735 фірми OSRAM, що має досить плоску характеристику у діапазоні 650–1050 нм. Цей світлодіод відповідає поставленим вимогам своєю спектральною характеристикою, але треба враховувати, що така велика ширина спектра досягнута за рахунок перетворення короткохвильового вузькосмугового випромінювання люмінофором у більш довгохвильове широкосмугове випромінювання. Оскільки люмінофор не є точковим джерелом світла то це ускладнює введення випромінювання у волокно. Випромінювання точкового джерела простіше сфокусувати на торці оптичного волокна.

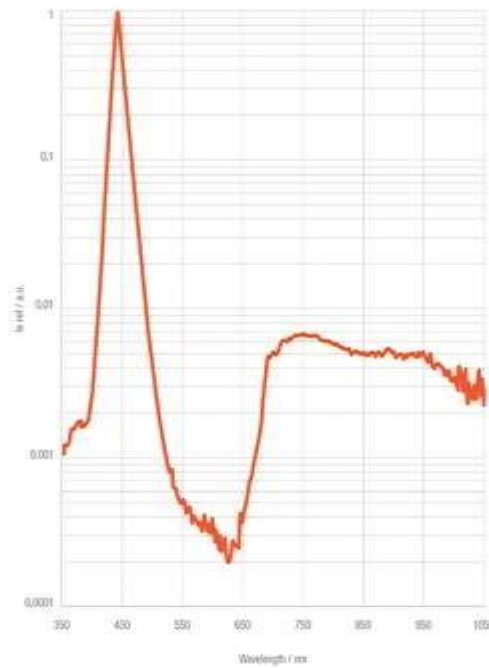


Рис. 3.3. Спектральна характеристика світлодіода SFH 4735

3.3. Розрахунок чутливості датчика з розподіленими параметрами

Вхідні дані для розрахунку:

- робочий діапазон температур: $\Delta T_{sens} = 100$ К;
- довжина оптичного волокна: $L = 1000$ м;
- кількість бреггівських ґраток: $N = 10$;
- показник заломлення серцевини кварцового волокна $n = 1.48$;
- залежність показника заломлення від температури $dn/dT = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;
- лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла
 $\alpha_T = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- період бреггівських ґрат $\Lambda = 0,1$ мм.

Для розрахунку чутливості датчика до температури скористаймося формулою (2.7):

$$\Delta\lambda_B = \Delta T,$$

звідки чутливість може подана як

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT} \right).$$

Приріст періоду ґратки знайдемо як

$$\Delta\Lambda = \alpha_T \Lambda,$$

де α_T – температурний коефіцієнт показника заломлення кварцового скла, що дозволяє переписати формулу як

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{\alpha_T \Lambda}{dT} \right)$$

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 * 10^{-4} (1.28 * 10^{-5} + 1.48 * 5.5 * 10^{-7}) = 2.72 * 10^{-9} \frac{\text{м}}{\text{К}} = 2,72 \text{ нм/К}.$$

Отже Як бачимо, чутливість сенсора пропорційна періоду БГ, однак у разі використання множини ґрат непотрібна висока чутливість, тому що спектри бреггівського розсіяння різних ґрат будуть перекриватися і буде неможливо їх розрізнити.

Зробімо розрахунок необхідної чутливості для $N = 10$ бреггівських ґрат, розташованих вздовж оптичного волокна. якщо ширина спектра джерела випромінювання становить $\Delta\lambda_{LED} = 200$ нм, а температурний діапазон роботи сенсора становить $\Delta T_{sens} = 100$ К. Шукана чутливість може бути знайдена із умови неперекриття спектральних діапазонів розсіяння бреггівських ґрат:

$$\Delta\lambda_{LED} = N S_T \Delta T,$$

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.м.	Підпис	Дата		49

звідки

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{LED}}{N\Delta T_{sens}}.$$

Підставляючи числові значення, знайдемо

$$S = \frac{200}{10 \cdot 100} = 0.2 \text{ нм/К}.$$

Висновок

Була розглянута структурна схема ВОД з розподіленими параметрами. Де джерелом живлення є світлодіод.

При розрахунку, за основні входні дані чутливості ВОД були взяті наступні дані, як залежність показника заломлення від температури, ПЗ серцевини кварцового волокна, лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла.

Чутливість дозволяє використовувати дані вимірювань для наукових цілей. Для покращення чутливості можна збільшити ширину спектра.

При температурному і механічному впливі змінюються показник заломлення решітки і період, внаслідок чого проходить зміщення довжини хвилі відбитого світла. Вимірюючи величину цього зміщення, можна визначити зміну температури і відносну деформацію.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		50

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Окоси Т. и др. 037 Волоконно-оптические датчики/Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.— 256 с: ил. ISBN 5-283-02466-0 (СССР); ISBN 4-274-03123-3 (Япония).
2. Основы волоконно-оптической связи: Пер. с англ./Под ред.. Е.М. Дианова. – М.: Сов.радио, 1980. – 232 с., ил.
3. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Б 92 Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения.— М.: Энергоатомиздат, 1990.-256 с: ил. ISBN 5-283-01523-8
4. Э.Удд. Волоконно-оптические датчики. М.:Техносфера, 2008. - 520с 5. Kincade, Kathy and Stephen Anderson (2005) "Laser Marketplace 2005: Consumer applications boost laser sales 10%", Laser Focus World, vol. 41, no. 1
6. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. 4-е изд. М.: Физический факультет МГУ, 2005. 282с. - с. 139 – 142
7. С. Тикадзуми Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. — М.: Мир, 1987. — 416 с.
8. Оптиелектроніка від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В.О. Чадюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – Кн. 1. -380 с.
9. С.В. Варжель Волоконные брэгговские решетки - Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015, 2015. - 65 с. - экз.
10. Труды Международного симпозиума «НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО»: Т78 в 2 т. - Пенза : ПГУ, 2015. – 2 том – 384
11. Середа П.В. Прецизионное определение параметров волоконных брэгговских решеток //Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург 2005.

					<i>ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ</i>	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		51

12. C.R. Giles, "Lightwave applications of fiber Bragg gratings", J. Lightwave Technol, 15 (8), pp.1391-1404,1997.

					<i>ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ</i>	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		52

S U M M A R Y

 Title of diploma project

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic devices and appliance Lishchynskyi Dmytro. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-zp71. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - p., Ill. , tables .

Single-mode fibers have a core diameter of not more

10 μm , the relative difference of refractive indices in them is approximately 0.3%. The shell has a diameter of 125 μm and consists of a material with alloying additives that change the refractive index. Such fibers are designed so that their normalized part v is less than 2.4 V . In single-mode fibers there is no temporary difference in the distribution of modes, unlike multimode, so they are extremely broadband (several tens of times, or even hundreds of times more) compared with gradient. The main factor limiting the bandwidth of single-mode fibers is the change in the refractive index of the material for different wavelengths, resulting in the bandwidth is inversely proportional to the width of the spectrum of the light source.

Birefringence is the phenomenon of propagation of electromagnetic waves in an anisotropic medium with the same frequency but different wavelengths and velocities.

In ordinary single-mode fibers, when light with linear polarization is introduced, connections between the HE_{11}^y mode and the HE_{11}^x mode are shown, which is shown in Fig. 1.5, fluctuations in the core diameter along the fiber due to external perturbations.

There are two types of optical fibers with birefringence:

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		53

1) a fiber of the stressed type, in which the difference $\Delta\beta$ arises as a result of the asymmetric distribution of mechanical stress in the core of the fiber, double beam refraction, which is due to mTypes of fiber-optic sensors.

Interferometric sensors. In fig. 1.7 shows the structure of fiber-optic interferometers, in particular in Fig. 1.7, a and b, are structures that are important for fiber-optic gyroscopes. They create a single system. In Mach - Zender interferometers for the sensing element, others - for the reference signal. Interferometers with polarized modes and Fabry-Pero interferometers are made on a single optical fiber and are designed using the characteristics of the fiber.

mechanical stress).

2) fiber with distribution, with asymmetry of distribution, refractive index, which causes the difference $\Delta\beta$ (double radial refraction, which is due to the geometry)

Types of fiber optic sensors.

Interferometric sensors. Fiber optic interferometer structures are structures that are important for fiber optic gyroscopes. They create a single system. In Mach - Zender interferometers for the sensing element, others - for the reference signal. Interferometers with polarized modes and Fabry-Pero interferometers are made on a single optical fiber and are designed using the characteristics of the fiber.

In the structures of interferometers, the intensity of interference P1 and P2 at the intensity of two or light waves I1 and I2, with the exception of Fabry-Perot interferometers is expressed as follows

Semiconductor light absorption sensors.

The structure and the principle of operation of the temperature sensor are described, the operation of this sensor is based on the optical properties of GaAs semiconductors and others. The semiconductor has a limiting wavelength λ_g of the optical absorption spectrum, and for light with a shorter length than λ_g , the absorption increases, the limiting wavelength λ_g shifts toward longer waves as the temperature increases. If the semiconductor crystal is clamped between the receiving and transmitting optical fibers and a beam is applied to it from a light source whose radiation spectrum is in the vicinity of the specified limit of the absorption spectrum,

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		54

then the light intensity passing through the sensor will decrease with increasing temperature. Thus, it is possible to measure the temperature of the output signal of the sensor.

Block diagram of the sensor. As a heat-sensitive material used GaAs (gallium arsenide), as a source of measuring signal LED based on AlGaAs (gallium aluminum arsenide), as a source of reference signal LED based on InGaAsP (arsenide-phosphide indium-gallium), light time of the same amplitude. When a measuring pulse passes through the gallium arsenide crystal (thermosensitive element), its amplitude decreases in proportion to the change in crystal temperature.

Sensors on microbends of fiber. General view of the hydrophone sensor (acoustic oscillations), which uses the effect of changing the optical losses, ie losses on the micro-bends of the fiber. They occur due to the influence of external factors on the periodic bending of the fiber. In a hydrophone, due to the design of the fiber-optic connector, the oscillations of the membrane under the action of a sound wave cause a change in the amplitude of the bends of the fiber. Sensitivity characteristic that allows the detection of sound pressure of approximately 0.1 PA. However, with periodic oscillations on the axis of the fiber and the lateral pressure between the modes, energy exchange occurs in accordance with the period of these oscillations. In this case, the conversion of modes between emitted and channeled light waves is used. As a result, it was found that with the quadratic distribution of the refractive index, the multimode fiber has an increased sensitivity to losses on microbends. The possibility of using this fiber-optic sensor as a strain gauge is being studied.

Bragg sensors. Because the sensor on the Bragg lattice is a fairly new, not sufficiently researched type of sensor, which has great potential for monitoring distributed parameters. This sensor can measure several physical parameters, but we will focus only on measuring stresses in deformed structures. Examples are arches and spans of bridges, beams in buildings, etc. To implement such measurements, OBs with multiple Bragg gratings, with different periods, are fixed on the structure, and the spectra of radiation reflected from each individual lattice are recorded, illuminating them with a broadband radiation source. The greater the stress of the

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		55

structural element, the stronger the fiber is stretched and the greater the displacement of the spectrum of reflected radiation.

There are many different ways to build sensor systems based on Bragg lattices. The sensor system is a point sensor (in the simplest case), connected via an optical splitter to the light source and the analyzer unit. From the source, the signal is reflected by a sensitive element. The wavelength of the reflection is fixed by the analyzer unit.

Fiber-optic sensors on Bragg lattices require a radiation source with significant power and a wide range.

This radiation source is a semiconductor LED.

A light-emitting diode (LED) is a semiconductor device that converts an electric current into light radiation. the wavelength of the radiation and its characteristics depend on the material from which the LED is made. The more "blue" the LED, the higher the energy of the quanta and the greater the band gap.

if a voltage is applied to it in the forward direction (to the anode - plus, and to the cathode - minus), the LED emits light. The minimum voltage of light emitted by an LED depends on its material. It can be seen that white and blue LEDs require the highest voltage, and red and infrared - the lowest. Infrared LED radiation is not visible to the human eye, so do not use LEDs such as indicators. They are most often used in various sensors, backlights of video cameras. Light-emitting diodes in the short-wavelength region of the visible spectrum, operating in the blue, violet and blue ranges, are based on GaN gallium nitride and heterojunctions using solid solutions of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ and $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$. On GaN, LEDs emit radiation $\lambda_{\text{max}} = 0.44 \text{ } \mu\text{m}$, but with low efficiency $\eta_{\text{zov}} = 0.5\%$.

SiC silicon carbide is also used to achieve this goal. Although such diodes have an even lower $\eta_{\text{zov}} = 0.01\%$, but they have high temperature and time stability. Based on them, reference radiation sources are created. Today, the digital camera is an indispensable element in scientific, educational, industrial or clinical laboratories. Every year, this device is increasingly used, as a result of the constant development of new technologies and functions, from the ability to capture the observed sample,

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		56

ending with reproduction in three-dimensional graphics of micro-objects. Despite the wide range of their capabilities, scientists and engineers who work with complex tasks, they often face the problem of dynamic processes or registration of weak signals, in which the next-generation sCMOS-camera is a leader.

Prior to the sCMOS camera, the phototechnics market was occupied only by devices that

use a CMOS matrix and devices on a CCD matrix. A CCD array is a silicon-based chip that consists of light-sensitive photodiodes that use charge-coupled (CCD) technology.

CCD arrays are very effective in detecting light and reducing noise. From the reading amplifier and from a weak signal.

However, the CCD array is a serial reading device, which is one of the main disadvantages, while allowing to obtain low noise due to the slow reading speed. When there is a need

to obtain a higher frame rate, the dynamic range is reduced or the reading noise is increased and the resolution is reduced.

The CMOS matrix is a chip on field-effect transistors with channels of different conductivity and an isolated gate, with

medium sensitivity, they can reach a fairly high frame rate. In a CMOS array, each individual pixel has an associated amplifier.

A row of pixels can be read parallel to the row by selecting a single pixel or register address using a column multiplexer.

					ДП.ДЕ71.05.000 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		57

					ДП. група. № по списку. 000ПЗ	Анк
ЗМН	Анк	№ локум	Пілпис	Дата		59